– ANAIS –

5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AMBIENTAL

VOLUME 3: ARTIGOS COMPLETOS



– EDIÇÃO LUSO-BRASILEIRA –

2026

Comissão Organizadora NACIONAL
Dr. Cristiano Poleto – IPH/UFRGS (**Presidente**)
Dr. Francisco Lledo dos Santos – UNEMAT
Dr. André Luis Sotero Salustiano Martim – UNICAMP
Dr. Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves – UFTM
Dr. Mário Sérgio da Luz – UFTM

Comissão Organizadora LOCAL
Dra. Cristiane Kreutz – UTFPR (**Presidente**)
Dra. Maristela Denise Moresco Mezzomo – UTFPR

Comissão Organizadora INTERNACIONAL
Dr. Jorge M. G. P. Isidoro – Univ. Algarve, Portugal (**Presidente**)
Dr. João L. M. Pedroso de Lima – Univ. Coimbra, Portugal
Dr. Manuel J. S. Feliciano – Instituto Politécnico de Bragança, Portugal
Dr. Vítor Jorge Pais Vilar – Universidade do Porto, Portugal

Comissão Organizadora de SESSÕES, PRÉ-EVENTOS e EVENTOS CONCOMITANTES
Dr. Tiago de Vargas – IPH/UFRGS
Dra. Maria Cristina de Almeida Silva – IPH/UFRGS
Dra. Franciéle Schwanck Carlos – IPH/UFRGS
Dra. Tássia dos Anjos Tenorio De Melo – UFPE
Dra. Zildamara dos Reis Holsback – UEMS
Dr. Hugo Morais de Alcântara – UFCG
Dr. Ibraim Fantin da Cruz – UFMT
Dra. Patrícia Diniz Martins – UFTM
Dr. Rodrigo Bruno Zanin – UNEMAT
Dr. Fábio Martins Ayres – UEMS

ANAIS DO 5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AMBIENTAL

VOLUME 3 – ARTIGOS COMPLETOS

2026

Copyright © **2026,** *by* **IAHR Publishing.**
Direitos Reservados en 2026 por **IAHR Publishing**.
Organização Geral da obra: Poleto, Cristiano; Kreutz, Cristiane; Mezzomo, Maristela Denise Moresco; dos Santos, Francisco Lledo; Martim, André Luis Sotero Salustiano; Gonçalves, Julio Cesar de Souza Inácio; da Luz, Mário Sérgio; Isidoro, Jorge M. G. P.
Diagramação: Cícero Manz Fagotti
Edição: Cristiano Poleto
Revisão: Elissandro Voigt Beier
Capa: Cícero Manz Fagotti

Copyright © *2026, by* **IAHR Publishing.**
Derechos Reservados en 2026 por **IAHR Publishing**.
Organización General de la Obra:
Maquetación: Cícero Manz Fagotti
Edición: Cristiano Poleto
Relectura General: Elissandro Voigt Beier
Portada: Cícero Manz Fagotti

Anais do 5º Congresso Internacional de Engenharia Ambiental - Volume 3 / Organizadores: Poleto, Cristiano; Kreutz, Cristiane; Mezzomo, Maristela Denise Moresco; dos Santos, Francisco Lledo; Martim, André Luis Sotero Salustiano; Gonçalves, Julio Cesar de Souza Inácio; da Luz, Mário Sérgio; Isidoro, Jorge M. G. P. – IAHR Publishing, 2026.

1148p.: il.;
ISBN • 97890837148-20

CDD: 600

É AUTORIZADA a livre reprodução, total ou parcial, por qualquer meio, sem autorização escrita do Editor ou dos Organizadores.

ES AUTORIZADA la libre reproducción, total o parcial, por cualquier medio, sin autorización escrita del Editor o de los Organizadores.

Comissão Organizadora NACIONAL

Dr. Cristiano Poleto (Presidente)
IPH/UFRGS

Dr. Francisco Lledo dos Santos
UNEMAT

Dr. Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves
UFTM

Dr. André Luis Sotero Salustiano Martim
UNICAMP

Dr. Mário Sérgio da Luz
UFTM

Comissão Organizadora LOCAL

Dra. Cristiane Kreutz (Presidente)
UTFPR

Dra. Maristela Denise Moresco Mezzomo
UTFPR

Comissão Organizadora INTERNACIONAL

Dr. Jorge M. G. P. Isidoro (Presidente)
Universidade do Algarve, Portugal

Dr. João L. M. Pedroso de Lima
Universidade de Coimbra, Portugal

Dr. Manuel J. S. Feliciano
Instituto Politécnico de Bragança, Portugal

Dr. Vítor Jorge Pais Vilar
Universidade do Porto, Portugal

Comissão Científica

ALINE FERRÃO CUSTODIO PASSINI - UFSM

ÁLVARO JOSÉ BACK - EPAGRI/SC

ALEJANDRO GUERRA - UNICURITIBA

ANDREA SARTORI JABUR - UTFPR

AMANDA GONÇALVES KIELING - UNISINOS

AMINTAS NAZARETH ROSSETE - UNEMAT

ANDRÉ LUIS SOTERO SALUSTIANO MARTIM - UNICAMP

ANDREZZA MARQUES FERREIRA - CEMADEN

ADRIANO FRUTOSO DA SILVA - UFRR

ARTUR JORGE DE JESUS GONÇALVES - INST. POL. DE BRAGANÇA, PORTUGAL

BRENNO SANTOS LEITE - UFV

CARLA ELOÍSA DINIZ DOS SANTOS - UFTM

CARLOS ALBERTO MENDES MORAES - UNISINOS

CAROLINA BUSO DORNFELD - UNESP

CELSO MACIEL DA COSTA - UERGS

CÍNTIA SOARES - UFSC

CLAUDIA TELLES BENATTI - UEM

CRISTIANE KREUTZ - UTFPR

CRISTHIANE MICHIKO PASSOS OKAWA - UEM

CRISTIANO POLETO - IPH/UFRGS

CRISTOVÃO V. S. FERNANDES - UFPR

DIEGO ANDRADE LEMOS - UFSCAR

DINÉIA TESSARO - UTFPR

DIOGO COSTA BUARQUE - UFES

EDUARDO ANTONIO MAIA LINS - IFPE

ELIZABETE YUKIKO NAKANISHI BAVASTRI - UFPR

EMERSON MACHADO DE CARVALHO - UFSB

EMÍLIO GRACILIANO FERREIRA MERCURI - UFPR

FABIANO QUADROS RÜCKERT - UFMS

FÁBIO MARTINS AYRES - UEMS

FÁTIMA APARECIDA DA SILVA IOCCA - UNEMAT

FERNANDA BAY HURTADO - UNIR

FERNANDA MIRANDA ZOPPAS - UNL, ARGENTINA

FERNANDO NEVES LIMA - UNIFEI

FERNANDO HERMES PASSIG - UTFPR

FERNANDO PERIOTTO - UFSCAR

FLAVIA SCHWARZ FRANCESCHINI ZINANI - IPH/UFRGS

FLÁVIO TELES CARVALHO DA SILVA - FAPEMAT

FLAVIO BENTES FREIRE - UTFPR

FRANCIÉLE SCHWANCK CARLOS - IPH/UFRGS

FRANCISCO JOSÉ DE PAULA FILHO - UFCA

FRANCISCO LLEDO DOS SANTOS - UNEMAT

FRANCISCO DE ASSIS DOURADO DA SILVA - UERJ

GERALDO DE FREITAS MACIEL - UNESP

GRAZIELE RUAS LAGOAS DA SILVA - UNESP

HUGO MORAIS DE ALCÂNTARA - UFCG

HYGOR ARISTIDES VICTOR ROSSONI - UFV

IBRAIM FANTIN DA CRUZ - UFMT

INDIANARA FERNANDA BARCAROLI - UDESC

JANAINA LOPES LEITINHO - UFC

JOEL DIAS DA SILVA - FURB

JOÃO PEDROSO DE LIMA - UNIVERSIDADE DE COIMBRA / PORTUGAL

JOICE KURITZA DENCK GONÇALVES - UFPR

JORGE MANUEL GUIEIRO PEREIRA ISIDORO - UNIV. DO ALGARVE / PORTUGAL

JORGE LUIS DE OLIVEIRA PINTO FILHO - UFERSA

JOSÉ AUGUSTO COSTA GONÇALVES - UNIFEI

JOSÉ CARLOS DE ARAÚJO - UFC

JOSÉ GILBERTO DALFRÉ FILHO - UNICAMP

JOSIANE TERESINHA CARDOSO - UDESC

JULIO CESAR DE SOUZA INÁCIO GONÇALVES - UFTM

KARINA BRUNO LIMA - UFRGS

KÁTIA VALÉRIA MARQUES CARDOSO PRATES - UTFPR

LAURA MARIA CANNO FERREIRA FAIS - UNICAMP

LILIANE LAZZARI ALBERTIN - UNESP

LUCIANA TURATTI - UNIVATES

LUCIJANE MONTEIRO DE ABREU - UNB

LUCIO DE SOUZA - UERJ

LUISA GARDÊNIA A. T. FARIAS - UFC

LUIS EDUARDO A. S. SUZUKI - UFPEL

MANUEL FELICIANO - INST. POL. DE BRAGANÇA, PORTUGAL

MARCELO GIOVANELA - UCS

MARCELO BORTOLI - UTFPR

MARIA CRISTINA DE ALMEIDA SILVA - UFRGS

MARIA CRISTINA DE OLIVEIRA - UNB

MARIA CRISTINA BORBA BRAGA - UFPR

MARIA CRISTINA BUENO COELHO - UFT

MARIA DE LOS ANGELES PEREZ LIZAMA - UNICESUMAR

MARLENE GUEVARA DOS SANTOS - UERGS

MÁRIO SÉRGIO DA LUZ - UFTM

MARISTELA DENISE MORESCO MEZZOMO - UTFPR

MAURICIO VICENTE ALVES - UNOESC

MAURÍCIO DE ANDRADES PAIXÃO - IPH/UFRGS

MICHAEL MANNICH - UFPR

MIGUEL MANSUR AISSE - UFPR

MORGANA SILVA - UFPEL

NARA LUÍSA REIS DE ANDRADE - UNIR

NATAN PADOIN - UFSC

PATRÍCIA DINIZ MARTINS - UFTM

PEDRO ALVES DA SILVA FILHO - UFRR

PEDRO ANTONIO ROEHE REGINATO - UFRGS

RAPHAEL CORRÊA MEDEIROS - UTFPR

REGINA TIEMY KISHI - UFPR

RENATO MIRANDA - USP

RICARDO HENRIQUE MORETON GODOI - UFPR

RICARDO JUNIOR DE ASSIS FERNANDES GONÇALVES - UEG

RODRIGO BRUNO ZANIN - UNEMAT

ROSANE FREIRE BOINA - UNESP

RONALTON EVANDRO MACHADO - UNICAMP

SIBELE AUGUSTA FERREIRA LEITE - UFV

SIDNEI LUÍS BOHN GASS - UNIPAMPA

SIMONE ANDREA FUREGATTI - UNESP

STENIO DE SOUSA VENANCIO - UFTM

TASSIA DOS ANJOS TENORIO DE MELO - UFPE

THIAGO MORAIS DE CASTRO - UTFPR

TIAGO DE VARGAS - UFRGS

VERALDO LIESENBERG - UDESC

ZILDAMARA DOS REIS HOLSBACK - UEMS



ORGANIZAÇÃO

UFRGS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

UFTM
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

UNEMAT
Universidade do Estado de Mato Grosso

1 2 9 0
UNIVERSIDADE D COIMBRA

UNICAMP

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

UFCG
Universidade Federal de Campina Grande

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

UAlg
UNIVERSIDADE DO ALGARVE

ipb
INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA

UEMS
Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul

U.PORTO

PATROCÍNIO

CNPq
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CAPES

Laboprime

SpInLab
Spatial Information Laboratory

envex
engenharia e consultoria

TEKS
Produtos e Sistemas
Remediação Ambiental

AgSolve

ARAUCÁRIA
FUNTEF-PR

APOIO

FABHAT
FUNDAÇÃO AGÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ

ALTO TIETÊ

REVISTA ENSAIOS DE GEOGRAFIA
Pós Geo
Universidade Federal Fluminense

IAHR
AIRH
International Association for Hydro-Environment Engineering and Research
Hosted by
Spain Water and IWHR, China

ProfÁgua

SUMÁRIO

10. Geotecnologias e Monitoramento Ambiental

RELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO, TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E NDVI EM PATOS-PB: ANÁLISE MULTITEMPORAL COM DADOS LANDSAT (2013 - 2023) 19

APLICAÇÃO DA SISMOGRAFIA COMO FERRAMENTA DE MONITORAMENTO GEOTÉCNICO: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ROCHAS CARBONÁTICAS E ITABIRÍTICAS 26

MAPEAMENTO E ANÁLISE DA VEGETAÇÃO ARBÓREA URBANA DO BIOMA PAMPAS ATRAVÉS DE IMAGENS ORBITAIS MULTIESPECTRAIS 41

MONITORAMENTO AMBIENTAL INTELIGENTE DO NÍVEL DE ÁGUAEM ÁREAS URBANAS PARA DRENAGEM SUSTENTÁVEL E RESILIÊNCIA A ALAGAMENTOS 48

AVALIAÇÃO LIMNOLÓGICA DO CÓRREGO DO TRAÍRA NO PARQUE BERNARDO BERNECK, VÁRZEA GRANDE - MT 53

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE SOLO E SUA INFLUÊNCIA NA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA NA ENCOSTA DA SERRA DO CURRAL, BELO HORIZONTE 58

ANÁLISE ESPAÇOTEMPORAL DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO EM UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DA MESORREGIÃO NORTE CENTRAL DO PARANÁ 65

INDICADORES AMBIENTAIS PARA O BAIXO SÃO FRANCISCO COM USO DE GEOTECNOLOGIAS 73

IMPACTOS DO MANEJO INTEGRADO DE BANCO DE DADOS AMBIENTAIS NA MITIGAÇÃO DE LACUNAS DE INFORMAÇÃO EM GRANDES COMPLEXOS INDUSTRIAIS 81

ANÁLISE MULTITEMPORAL DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GUAMÁ E OUTROS (PA) 87

MUDANÇAS NO USO DA TERRA E PRESSÕES AMBIENTAIS: UMA ABORDAGEM ESPAÇO-TEMPORAL COM DADOS DO MAPBIOMAS NA REGIÃO DE SÃO CARLOS (SP) 92

MODELAGEM PREDITIVA DA DINÂMICA DE USO E COBERTURA DA TERRA NA BACIA DO RIO TEJIPIÓ, PERNAMBUCO, BRASIL 100

ÍNDICE ESPECTRAL DE VEGETAÇÃO COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DE ARBORIZAÇÃO URBANA: O CASO DA CIDADE INTELIGENTE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS (SP) 108

FRAGMENTAÇÃO FLORESTAL E ASSIMILAÇÃO DO CARBONO EM UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DO SUL DA BAHIA 115

A AVALIAÇÃO DAS VARIAÇÕES TEMPORAIS DAS ALTITUDES NAS ESTAÇÕES IHRF UTILIZANDO DADOS GRACE/GRACE-FO E GNSS 123

TRANSFORMAÇÕES NO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA REGIÃO DE INTEGRAÇÃO DE CARAJÁS (PA) ENTRE 1985 E 2024 129

EVOLUÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO MUNICÍPIO DE VANINI-RS: SUBSÍDIOS AO PLANEJAMENTO AMBIENTAL MUNICIPAL 135

ESTUDO ESPAÇO-TEMPORAL DO SALDO DE TEMPERATURA EM ÁREAS URBANAS: UMA ABORDAGEM INTEGRADA DERIVADA DO BALANÇO DE ENERGIA 143

ANÁLISE DA FRAGILIDADE AMBIENTAL POTENCIAL E EMERGENTE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DO MONJOLINHO, SÃO CARLOS (SP) 151

ANÁLISE DA RECUPERAÇÃO AMBIENTAL POR ABANDONO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO NO MUNICÍPIO DE MAFRA, SANTA CATARINA, BRASIL 159

ANÁLISE DE PIPELINES DE APRENDIZADO DE MÁQUINA COM IMAGENS HIPERESPECTRAIS PARA DETECÇÃO DE METANO..... 167

GEO+IA PARA ANÁLISE DE DINÂMICA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E SUA RELAÇÃO COM ONDAS DE CALOR 173

ANÁLISE COMPARATIVA DE DEM NA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE RUIDO..... 180

ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO COMO MONITORAMENTO AMBIENTAL DE UM PARQUE URBANO 184

MODELAGEM HIDRO-TOPOGRÁFICA E CAPACIDADE ADAPTATIVA: SUBSÍDIOS AO ORDENAMENTO DA EXPANSÃO URBANA NA ZEU DE ITAPEVI (SP) 190

MODELING CHANGES IN LAND USE AND COVER USING TRANSITION MATRICES IN AN AMAZONIAN BIOLOGICAL RESERVE..... 197

HYDROLOGICAL RISK SIMULATION DATA SUPPORT AND ANALYSIS SYSTEM 206

ANÁLISE MULTITEMPORAL DA COBERTURA VEGETAL NA REGIÃO DA CHAPADA DOS GUIMARÃES UTILIZANDO DADOS DO MAPBIOMAS (1985–2024)..... 213

USO DE GEOTECNOLOGIAS NA ANÁLISE DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA E IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS NA BACIA DO RIO UNA (PE) 219

MODELAGEM ESPACIAL APLICADA A UNIVERSALIZAÇÃO DO ESGOTAMENTO SANITÁRIO DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA COM USO DE MACHINE LEARNING..... 226

SUSCETIBILIDADE AOS EVENTOS DE CHEIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ACRE – ACRE, BRASIL..... 235

DINÂMICA DO USO E COBERTURA DO SOLO NO CENTRO URBANO SANTA MARIA (RS) ENTRE 2014 E 2024: ANÁLISE DE MÉTRICAS DE PAISAGEM E ÍNDICES DE DIVERSIDADE 242

AVALIAÇÃO DA RAZÃO IDEAL PARA ADSORÇÃO DE ARSÊNIO POR TURFA TROPICAL.... 249

MAPEAMENTO GEOLÓGICO NA SERRA DE SÃO JOSÉ, ENTRE CORONEL XAVIER CHAVES E PRADOS (MG) COMO SUBSÍDIO A GEOCONSERVAÇÃO AMBIENTAL..... 257

ANÁLISE DO USO DA TERRA E COBERTURA VEGETAL DA BACIA DO RIO SALOBRA - MS, BRASIL 265

DINÂMICA MORFOMÉTRICA E INFLUÊNCIA AMBIENTAL NO RIO ANDRADA: UMA ANÁLISE EM SIG 273

ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE PILAR, ALAGOAS - BRASIL..... 280

FIRE REGIME TRANSITIONS IN THE STATES OF MARANHÃO, TOCANTINS, PIAUÍ, AND BAHIA: A 20-YEAR ANALYSIS USING MAPBIOMAS DATA..... 287

RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE TERRESTRE E ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO E ÁREAS URBANIZADAS EM REGIÃO DE CLIMA SEMIÁRIDO 294

ESTIMATIVA DA PERDA ANUAL DE SOLO POR EROSÃO HÍDRICA NA BACIA DO IGARAPÉ SANTOS, TUCURUÍ, PARÁ..... 301

CARACTERIZAÇÃO DA POLUIÇÃO LUMINOSA NO PARQUE ESTADUAL DA SERRA DO BRIGADEIRO - MG POR SENSORIAMENTO REMOTO 309

DETECÇÃO DE PALMEIRAS EM FLORESTA OMBRÓFILA DENSA: USO DE DRONES E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL 316

VALIDAÇÃO DE TEMPERATURA OBTIDA VIA SATÉLITE LANDSAT UTILIZANDO DADOS DE SUPERFÍCIE PARA O MUNICÍPIO DE UBERLÂNDIA-MG, NO PERÍODO DE 2011 A 2024 323

SUSCETIBILIDADE A EVENTOS DE INUNDAÇÃO COMO SUBSÍDIO AO PLANEJAMENTO URBANO: ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA BACIA DE CONTRIBUIÇÃO DO CANAL DO GRANJEIRO, CRATO-CE 330

ANÁLISE COMPARATIVA DOS FOCOS DE QUEIMADAS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS MOGI-GUAÇU E PARDO (2024-2025) 338

USO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA MODELAGEM ESPACIAL EM UNIDADES DE CONSERVAÇÃO: O CASO DO PARQUE ESTADUAL DO JURUPARÁ 346

EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE DRENAGEM UTILIZANDO DADOS ANADEM NA MICROBACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO LARANJAL, NOVA ANDRADINA/MS 354

COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO ALOS PALSAR E SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION PARA ANÁLISE DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO XAMBRÊ, NOROESTE DO PARANÁ 362

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DO LIDAR TERRESTRE BASEADO EM SLAM NA ESTIMATIVA DO DAP EM AMBIENTE FLORESTAL 368

PARÂMETROS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS LIDAR COM RPA EM RESERVAS URBANAS: UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL 375

MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO AMBIENTAL AUTÔNOMO E CONTÍNUO: GESTÃO PROATIVA DE RISCO EM ZONAS GEOTÉCNICAS SENSÍVEIS 383

DESEMPENHO DE PRODUTOS GRADEADOS DE PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO RIO SOTURNO EM CONTEXTO DE EXTREMOS HIDROCLIMÁTICOS 390

11. Governança Climática e Participação Social

PERCEPÇÃO DA COMUNIDADE COMERCIAL SOBRE A EFETIVIDADE DE MEDIDAS ESTRUTURANTES NA MITIGAÇÃO DE INUNDAÇÕES URBANAS 399

ANÁLISE DOS IMPACTOS SOCIOECÔNOMICOS DA CRISE CLIMÁTICA E DOS DESAFIOS PARA A GOVERNANÇA CLIMÁTICA EM JOINVILLE/SC 404

GOVERNANÇA CLIMÁTICA E DEMOCRACIA URBANA: LIMITES E POSSIBILIDADES DA PARTICIPAÇÃO SOCIAL NA POLÍTICA CLIMÁTICA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO 412

CONTRIBUIÇÕES E DESAFIOS PARA A FORMULAÇÃO DE POLÍTICAS CLIMÁTICAS: UMA ANÁLISE DO COMITÊ GESTOR INTERSECRETARIAL DE JUSTIÇA CLIMÁTICA EM SÃO VICENTE (SP) 419

12. Hidrossedimentologia

ANÁLISE DA VARIABILIDADE HIDROLÓGICA LONGITUDINAL E DISPONIBILIDADE HÍDRICA A JUSANTE: O CASO DA UHE ITIQUIRA (MT) 427

MORFOMETRIA FLUVIAL E CONECTIVIDADE HIDRODINÂMICA NA REGIÃO ALUVIAL DO RIO DO PEIXE, OESTE PAULISTA 435

RELIABILITY ASSESSMENT OF BATHYMETRIC SURVEYS FOR RESERVOIR USEFUL-LIFE ANALYSES 443

13. Infraestrutura Azul e Resiliência Costeira

INFRAESTRUTURAS VERDE-CINZA PARA RENATURALIZAÇÃO DE ÁREAS DE MANGUEZAIS NO ENTORNO DA PA-458 (BRAGANÇA–AJURUTEUA) 450

EVENTOS EXTREMOS E RESILIÊNCIA COSTEIRA NA CIDADE DO RECIFE: O PAPEL DA INFRAESTRUTURA AZUL NA PROTEÇÃO DA CIDADE 458

ESPODOSSOLOS E VULNERABILIDADE AMBIENTAL NA ESTAÇÃO ECOLÓGICA JURÉIA-ITATINS (SP): UMA ANÁLISE PRELIMINAR 464

14. Infraestrutura Verde e Cidades Inteligentes

BIOCHAR FROM WOOD WASTE AS A SUBSTRATE CONDITIONER FOR GREEN ROOF: EFFECT ON ELEMENT LEACHING 471

AVALIAÇÃO DA DINÂMICA HIDROLÓGICA EM UMA MICROBACIA URBANA UTILIZANDO TÉCNICAS LID 479

SEGURANÇA HÍDRICA E RESILIÊNCIA CLIMÁTICA NO ALTO IGUAÇU: O MODELO DE INFRAESTRUTURA VERDE DO PARANÁ 487

INFRAESTRUTURA VERDE URBANA E SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS: O CASO DO PARQUE LAGO DE OLARIAS EM PONTA GROSSA (PR) 493

CIDADES ESPONJA E INFRAESTRUTURA VERDE NA MITIGAÇÃO DE ENCHENTES URBANAS: ANÁLISE HIDRODINÂMICA APLICADA AO RIBEIRÃO ARRUDAS, BELO HORIZONTE 499

URBANIZAÇÃO, IMPACTOS AMBIENTAIS E SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA EM GUARATIBA (RJ): UMA ANÁLISE INTREGADA (1985-2024) 508

XERISCAPING: FATORES DE ADOÇÃO DA TÉCNICA DE PAISAGISMO SOB A PERSPECTIVA DA MATRIZ SWOT 516

WETLANDS COMO ALTERNATIVA DE REVITALIZAÇÃO SOCIAL E AMBIENTAL POR MEIO DE JARDINS FILTRANTES NO CANAL DERBY-TACARUNA NO RECIFE 524

PAVIMENTOS PERMEÁVEIS: UMA ALTERNATIVA PARA REDUZIR TEMPERATURA EM CENTROS URBANOS 531

INFRAESTRUTURA VERDE URBANA E CLIMA: LACUNAS DE PESQUISA E OPORTUNIDADES PARA FORMULAÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS EM CONTEXTOS TROPICAIS 538

CONECTIVIDADE DA PAISAGEM: PROPOSIÇÃO DE CORREDORES ECOLÓGICOS ENTRE O PARQUE NACIONAL DE BRASÍLIA E A ESTAÇÃO ECOLÓGICA DE ÁGUAS EMENDADAS 546

MODELAGEM ESTATÍSTICA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE EM SANTO ANDRÉ (SP): DETERMINANTES MORFOLÓGICOS E AMBIENTAIS 553

WETLANDS CONSTRUÍDOS: A IMPORTÂNCIA NO DESENVOLVIMENTO DAS CIDADES 560

MAPEAMENTO DE METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO PARA INCÊNDIOS EM CONTEXTO URBANO – PROTOCOLO DE REVISÃO DE ESCOPO 5608

15. Inteligência Artificial e Sustentabilidade

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E SUSTENTABILIDADE DE ESTRUTURAS DE SOMBREAMENTO PARA ÁREAS DE PASTEJO DE GALINHAS POEDEIRAS EM SISTEMA FREE-RANGE 576

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E BIG DATA NO MONITORAMENTO E CONTROLE DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA COM ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA 582

DA AUDITORIA ENERGÉTICA ÀS PLATAFORMAS DIGITAIS: UM MODELO SAAS PARA GESTÃO ENERGÉTICA ESCALÁVEL E INTEGRAÇÃO ESG 590

APRENDIZADO DE MÁQUINA NA PREVISÃO DE VAZÃO DO RIO SÃO FRANCISCO 593

AGRUPAMENTO VISUAL AUTOMÁTICO DE IMAGENS DE AGREGADOS DE SOLO POR APRENDIZADO DE MÁQUINA NÃO SUPERVISIONADO 601

O CONFLITO DA ARBORIZAÇÃO URBANA E REDES DE ENERGIA: O CASO DO DISTRITO DE JARDIM ÂNGELA, SÃO PAULO, SP 608

FERRAMENTA BASEADA EM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA PREDIÇÃO DA POROSIDADE E SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE MEMBRANAS ELETROFIADAS NA FILTRAÇÃO DE AEROSSÓIS 615

ANÁLISE ESPACIAL E PREDITIVA DE COLISÕES ENTRE VEÍCULOS E FAUNA SILVESTRE NA BR-471, ESEC-TAIM 622

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE PONDERAÇÃO POR AVALIAÇÃO HUMANA E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ANÁLISE DE RESTRIÇÃO AMBIENTAL EM AMBIENTE SIG 629

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MODELAGEM BASEADA EM DADOS EM SISTEMAS AMBIENTAIS: POTENCIAL, DESAFIOS E APLICAÇÕES PREDITIVAS 637

PREVISÃO DE NÍVEL DE RIO EM CURTO PRAZO COM APRENDIZADO DE MÁQUINA A PARTIR DE DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS 643

16. Justiça Climática e Direitos Humanos Ambientais

DIREITOS HUMANOS, JUSTIÇA ENERGÉTICA E CLIMÁTICA E OS COMPROMISSOS COM OS ODS 2030 E LIMITES PLANETÁRIOS 651

DRENAGEM URBANA, JUSTIÇA CLIMÁTICA E DESAFIOS DO BEM VIVER: UMA ANÁLISE SOCIOAMBIENTAL INTEGRADA NO CANAL SÃO JOAQUIM (BELÉM-PA) 657

O CALOR COMO CATALISADOR DA DESIGUALDADE EDUCACIONAL NO SUL GLOBAL 664

17. Logística Reversa e Cadeias de Fornecimento Responsáveis

GESTÃO SUSTENTÁVEL DE BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS AO FIM DA VIDA ÚTIL: LOGÍSTICA REVERSA E CADEIAS DE FORNECIMENTO 672

PROPOSTA DE LOGÍSTICA REVERSA PARA O ÓLEO VEGETAL RESIDUAL DOMÉSTICO EM ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE SANTO ANTÔNIO DA PATRULHA/RS 680

18. Meio Ambiente Políticas Públicas, Legislação e Licenciamento Ambiental

BRAZIL'S REGULATORY FRAMEWORK FOR BIODIESEL AND BIOMETHANE IN LONG-HAUL FREIGHT TRUCKING: ADVANCES, GAPS, AND BARRIERS 688

VALORAÇÃO DE DANOS AMBIENTAIS PARA FINS DE COMPENSAÇÃO AMBIENTAL DECORRENTES DE LANÇAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS *IN NATURA* GERADOS EM JOINVILLE/SC 700

O NOVO MARCO ESTADUAL DA COMPENSAÇÃO DE RESERVA LEGAL: PERSPECTIVAS, INOVAÇÕES E DESAFIOS NA REGULARIZAÇÃO FUNDIÁRIA DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO EM MATO GROSSO 706

INCENTIVOS AMBIENTAIS E COMPETIÇÃO FISCAL: UMA ANÁLISE DO FATOR ÓLEO VEGETAL NO ICMS ECOLÓGICO DO RIO DE JANEIRO 711

PRINCIPAIS IMPACTOS DE USINAS FOTOVOLTAICAS E SUAS IMPLICAÇÕES PARA A AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL: UMA REVISÃO DE LITERATURA 719

A LEI GERAL DO LICENCIAMENTO AMBIENTAL E A TRANSIÇÃO DO CONTROLE AMBIENTAL: UMA ANÁLISE COMPARATIVA EM CINCO ESTADOS BRASILEIROS 725

ÁGUA E ESGOTAMENTO SANITÁRIO ÀS EXIGÊNCIAS DA LEI Nº 14.026/2020 - MARCO LEGAL DO SANEAMENTO BÁSICO: ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE CRISTALINA - GO 732

IMPACTOS DA FLEXIBILIZAÇÃO DAS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE ATRAVÉS DA LEI 14.285/2021: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE CANOINHAS 741

DA CONFORMIDADE NORMATIVA À GOVERNANÇA ORIENTADA POR EVIDÊNCIAS: DESAFIOS DA INSTITUCIONALIZAÇÃO DOS PLANOS DE LOGÍSTICA SUSTENTÁVEL EM INSTITUIÇÕES FEDERAIS DE ENSINO 748

DETECÇÃO MULTITEMPORAL DE INFESTAÇÃO POR MACRÓFITAS EM RESERVATÓRIO HIDRELÉTRICO COM IMAGENS SENTINEL-2 E NDVI 754

ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO INSTITUCIONAL DO LICENCIAMENTO AMBIENTAL EM MUNICÍPIOS DA BACIA DO RIO PIRANGA EM MINAS GERAIS 762

DIAGNÓSTICO DOS PASSIVOS AMBIENTAIS EM ÁREAS PROTEGIDAS DOS IMÓVEIS RURAIS IMPACTADOS COM REJEITOS DE MINERAÇÃO DA BARRAGEM DE FUNDÃO .. 769

AVALIAÇÃO DO SUBCRITÉRIO ÍNDICE DE CONSERVAÇÃO DO ICMS ECOLÓGICO PARA MUNICÍPIOS MINEIROS 776

NOVA LEI GERAL DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL E SEUS IMPACTOS PARA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO NO RIO GRANDE DO SUL 783

GESTÃO COSTEIRA: REVISÃO DA LEGISLAÇÃO AMBIENTAL E DOS DESAFIOS CLIMÁTICOS DA ORLA DE BOA VIAGEM 791

LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE POSTOS DE COMBUSTÍVEIS EM ALTAMIRA (PA): EVOLUÇÃO NORMATIVA E IMPLICAÇÕES PARA A PROTEÇÃO AMBIENTAL 798

RECONFIGURAÇÃO TERRITORIAL A PARTIR DA LEI 12.678/2012 E OS DESAFIOS DE MOBILIDADE NA SEDE DE AVEIRO (PA) 805

ANÁLISE COMPARATIVA DAS NARRATIVAS SOCIAIS E INSTITUCIONAIS SOBRE IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS DA BARRAGEM DE FRONTEIRAS, EM CRATEÚS-CE 812

19. MOBILIDADE URBANA

MONITORAMENTO DO SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO RODOVIÁRIO COLETIVO DO DISTRITO FEDERAL: UM ÍNDICE DE QUALIDADE DO TRANSPORTE PARA O SERVIÇO BÁSICO 819

O USO DA MODELAGEM BASEADA EM AGENTES NA MOBILIDADE: UMA REVISÃO DA LITERATURA 826

ROTAS ACESSÍVEIS NO AMBIENTE URBANO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOB A PERSPECTIVA DA PERCEPÇÃO DO USUÁRIO COM DEFICIÊNCIA 832

PONDERAÇÃO DE RISCOS EM PASSAGENS EM NÍVEL FERROVIÁRIAS UTILIZANDO O MÉTODO *ANALYTIC HIERARCHY PROCESS* (AHP) 840

MOBILIDADE URBANA E EMISSÕES DE GEE EM FLORIANÓPOLIS: UMA ANÁLISE CRÍTICA DA DEPENDÊNCIA MODAL RODOVIÁRIA COMO EXPRESSÃO DA PRODUÇÃO DO ESPAÇO 846

A ELETRIFICAÇÃO DA FROTA VEICULAR E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS 854

NEXOS ENTRE FORMA URBANA E MODOS DE TRANSPORTE ADOTADOS EM CIDADES PEQUENAS E COMPACTAS: UM ESTUDO EMPÍRICO EM PIRATININGA (SP) 861

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA RUMO A CIDADES SUSTENTÁVEIS: ESTUDO DE CASO DO OESTE PARANAENSE 869

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA EMBARCADO DE AQUISIÇÃO DE DADOS (DATA LOGGER) PARA ANÁLISE CINEMÁTICA EM MICROMOBILIDADE 880

20. Mudanças Climáticas e Eventos Extremos

SENSIBILIDADE TEMPORAL DO PARÂMETRO GRADEX E IMPLICAÇÕES NO DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO 887

SEGURANÇA DE BARRAGENS NOS CONTEXTOS DE EXTREMOS CLIMÁTICOS, UTILIZANDO ABORDAGENS DE MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA: UMA REVISÃO 896

SPATIAL INTERPOLATION FOR MUNICIPALITY-SCALE TEMPERATURE ESTIMATION IN SÃO PAULO: CHALLENGES IN REPRESENTING EXTREME VALUES 904

IMPACTO DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA ÁFRICA OCIDENTAL: UM DEBATE SOBRE O ESTADO DA DEGRADAÇÃO AMBIENTAL NA GUINÉ-BISSAU DURANTE AS PRIMEIRAS DÉCADAS DO SÉCULO XXI 912

CONTRIBUIÇÃO ÀS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DECORRENTE DA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE DESASTRE HIDROLÓGICO EM ATERROS SANITÁRIOS: ESTUDO NO SUL DO ESPÍRITO SANTO, BRASIL 918

MULTISCALE CLIMATE VULNERABILITY ASSESSMENT IN SÃO PAULO STATE FOR CLIMATE ADAPTATION PLANNING 924

EFEITOS DAS ANOMALIAS DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR SOBRE O REGIME PLUVIOMÉTRICO DE JABOATÃO DOS GUARARAPES (PE) 933

MACHINE LEARNING NA PREVISÃO DE NÍVEIS HÍDRICOS URBANOS: O CASO DO RIO ACARI, RIO DE JANEIRO 940

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE MACROGRENAGEM CONSIDERANDO CENÁRIOS DE CHUVAS EXTREMAS 948

EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO EXTREMA E SEUS IMPACTOS NA BARRAGEM DE CONTENÇÃO OESTE NO ALTO VALE DO ITAJAÍ/SC 954

POTENCIAL IMPACTO DOS MODOS DE VARIABILIDADE E MUDANÇA DO CLIMA NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO SISTEMA IMUNANA-LARANJAL 962

RESILIÊNCIA CLIMÁTICA EM PROJETOS DE REMEDIAÇÃO AMBIENTAL: SOLUÇÃO RESILIENTE ÀS CHEIAS EXTREMAS DE 2024 PARA SOLOS CONTAMINADOS POR METAIS 970

DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DE PROJETO POR ABORDAGENS DETERMINÍSTICA E ESTATÍSTICA 977

ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO DE EQUAÇÕES IDF GERAL E ESPECÍFICA POR PERÍODO DE RETORNO NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO 985

TENDÊNCIAS DE PRECIPITAÇÃO E DIAS SECOS NA BACIA DO RIO FORMOSO (TO): IMPLICAÇÕES PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS 990

PONDERAÇÃO DE INDICADORES DE RESILIÊNCIA EM REDES DE TRANSPORTES UTILIZANDO *SOCIAL CHOICE FUNCTIONS* 997

ANÁLISE MECÂNICA E HIDRÁULICA DE PAVIMENTO PERMEÁVEL COM GEOCÉLULA E CONCRETO POROSO 1005

MUDANÇAS CLIMÁTICAS; INSTRUMENTOS LEGAIS AMBIENTAIS CONTRA OS IMPACTOS INDUSTRIAIS SOBRE AS GELEIRAS 1013

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E EVENTOS EXTREMOS: COMO AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS AFETAM A GOVERNANÇA E A ESTABILIDADE POLÍTICA? 1020

AGROFORESTRY INFRASTRUCTURE AS A TERRITORIAL STRATEGY FOR CLIMATE RESILIENCE: AN INTEGRATED SPATIAL ANALYSIS IN RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL 1025

RESILIÊNCIA DE UM SISTEMA DE DRENAGEM SUPERFICIAL NA CIDADE DO RECIFE – PE FRENTE À URBANIZAÇÃO E ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS..... 1033

ANÁLISE DOS EVENTOS EXTREMOS DE TEMPERATURA DO AR E ONDAS DE CALOR EM JOÃO PESSOA-PB (1990–2023)..... 1041

EFEITOS DA SECA DE 2023 - 2024 NO QUILOMBO MURUMURUTUBA, SANTARÉM - PA... 1047

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PLANEJAMENTO URBANO: ANÁLISE DE CONTEÚDO SOBRE ADAPTAÇÃO E RESILIÊNCIA NOS PLANOS DIRETORES 1055

MONITORAMENTO DE PRECIPITAÇÃO EM UBERLÂNDIA - MG NO PERÍODO DE 2005 A 2025 1061

AVALIAÇÃO DE PRODUTOS DE PRECIPITAÇÃO POR SATÉLITE: UMA ABORDAGEM ENTROPIA-TOPSIS NA BACIA DO RIO IBIRAPUITÃ (RS) 1067

ANÁLISE DOS SOLOS ANTRÓPICOS NA APA ARAGUAIA (ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DE SÃO GERALDO DO ARAGUAIA) 1075

ANÁLISE PRELIMINAR DA ESTABILIDADE DO LEITO EM UM RIO DE ENCOSTA APÓS PRECIPITAÇÃO EXTREMA 1081

ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E EVENTOS EXTREMOS ASSOCIADOS AOS IMPACTOS NA SAÚDE ÚNICA 1087

DINÂMICA DAS CHUVAS E VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL NO RECIFE: UMA ANÁLISE DE 25 ANOS NA ESTAÇÃO ALTO DA BRASILEIRA 1094

ANÁLISE HIDRÁULICA DE UMA PONTE EM CANAL TRAPEZOIDAL SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE VAZÃO POR MEIO DO HEC-RAS.....1102

MODELAGEM DE SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA USANDO REALIDADE AUMENTADA APLICADA À GESTÃO DE RISCO DE INUNDAÇÕES, ENCHENTES E ALAGAMENTOS ..1110

ANÁLISE DA SEVERIDADE DOS EXTREMOS CLIMÁTICOS E DOS DESASTRES ASSOCIADOS ÀS VARIABILIDADES CLIMÁTICAS NA BACIA DO RIO IPOJUCA EM PERNAMBUCO 1118

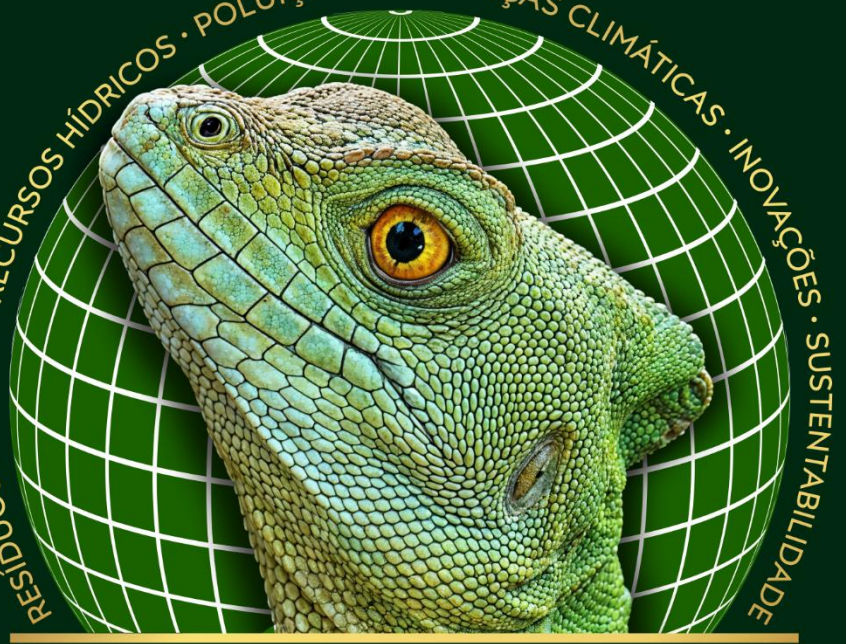
GESTÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS EM MINAS DE CALCÁRIO NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA: VULNERABILIDADE, LACUNAS E DIRETRIZES OPERACIONAIS DE CURTO PRAZO 1125

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E PROJEÇÕES DE VAZÃO SOB CENÁRIOS CMIP6 NA BACIA DO RIO PATIVILCA (ANDES PERUANOS) UTILIZANDO SWAT E 14 MODELOS CLIMÁTICOS 1131

INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA FORMAÇÃO DE ILHAS DE CALOR EM UBERABA (MG).....1142

INFLUENCE OF LAND USE AND LAND COVER ON THE FORMATION OF URBAN HEAT ISLANDS IN UBERABA (MG).....1142

ARTIGOS COMPLETOS



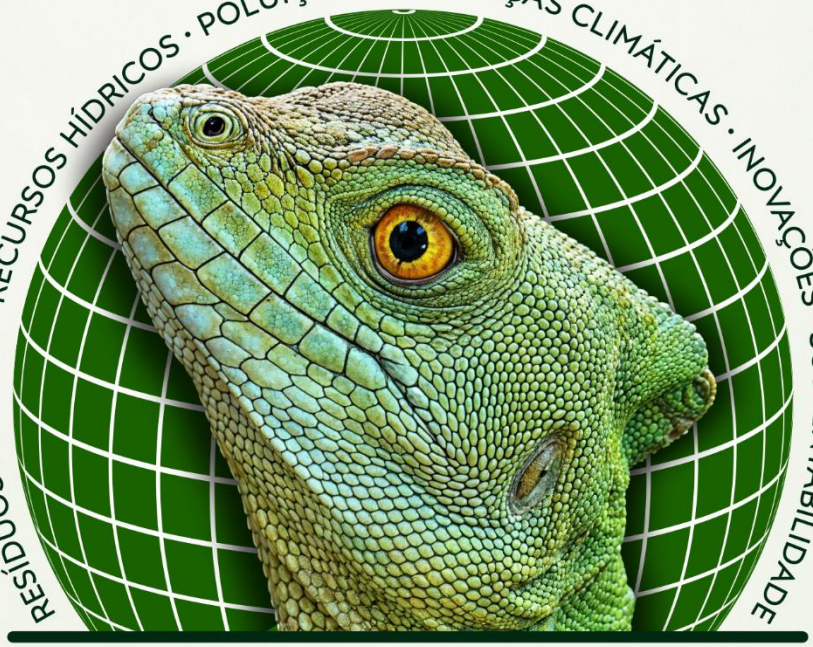
5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AMBIENTAL

– EDIÇÃO LUSO-BRASILEIRA –

2026

ÁREA TEMÁTICA 10

GEOTECNOLOGIAS E MONITORAMENTO AMBIENTAL



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

RELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO, TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E NDVI EM PATOS-PB: ANÁLISE MULTITEMPORAL COM DADOS LANDSAT (2013 - 2023)

1 Mateus Stefany Da Silva Santos, 2 Maria Claudia de Melo Alves
1 Universidade Federal da Paraíba, e-mail: mateusfjp5@gmail.com; 2 Universidade Federal da Paraíba, e-mail: mariaclaudia.amaterasu@gmail.com;

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; Semiárido; Variabilidade Climática.

Resumo

A região semiárida brasileira é marcada por uma acentuada variabilidade climática que condiciona a dinâmica dos ecossistemas locais. Este estudo analisa a dinâmica climática e ambiental de Patos, Paraíba, entre 2013 e 2023, com foco na relação entre precipitação, temperatura de superfície (LST) e índice de vegetação (NDVI). O município apresenta condições térmicas extremas, com médias máximas que frequentemente ultrapassam os 36°C. A metodologia consistiu no processamento de imagens dos satélites Landsat 8 (para 2013 e 2018) e Landsat 8/9 (para 2023), combinadas com dados pluviométricos da AESA (Estação C-031). As imagens foram selecionadas para os meses de julho e agosto (período de seca máxima), com cobertura de nuvens inferior a 30%. Os resultados indicam que o ano de 2013, sob severo estresse hídrico (379,6 mm), registrou a maior média térmica (42,93°C) e o menor vigor vegetativo (NDVI médio 0,149). Em contraste, 2018 (489,2 mm) apresentou um pico de regeneração da vegetação (NDVI 0,170) após pulsos hídricos concentrados, com redução da LST para 40,96°C. O ano de 2023 (765,8 mm, próximo da média histórica) consolidou uma tendência de resfriamento relativo (40,59°C), embora com maior fragmentação da paisagem e heterogeneidade. Conclui-se que a precipitação atua como o principal agente regulador térmico, onde a cobertura vegetal mitiga as temperaturas extremas via evapotranspiração. O sensoriamento remoto orbital revela-se ferramenta decisiva para o monitoramento e planejamento de políticas públicas em regiões semiáridas vulneráveis às mudanças climáticas.

Introdução

O município de Patos está localizado na Mesorregião do Sertão Paraibano e Microrregião de Patos, no setor central do estado da Paraíba. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município posiciona-se na latitude 07°01'28" Sul e longitude 37°16'48" Oeste, representando um dos cenários mais emblemáticos para o estudo de extremos climáticos no Nordeste brasileiro. Situado na unidade geoambiental da Depressão Sertaneja, o município é notabilizado por registrar picos térmicos que frequentemente figuram entre os mais elevados do território nacional. Sob a classificação climática de Köppen como semiárido quente (BSh), a região é marcada por uma forte irregularidade pluviométrica, altas taxas de evapotranspiração e uma insolação persistente, fatores que condicionam diretamente o balanço de energia na superfície e a qualidade de vida da população local.

A dinâmica ambiental desta porção do semiárido é regida por uma interação complexa entre os sistemas meteorológicos e as características biofísicas da Caatinga. Conforme Ab'Sáber (2003), este domínio morfoclimático possui uma instabilidade hidrológica intrínseca, onde a vegetação caducifólia atua como biomonitor das condições hídricas. Em períodos de seca, a perda da biomassa foliar resulta na exposição direta do solo, alterando o albedo e elevando a Temperatura de Superfície (LST). Conforme discutido por Luz e Galvincio (2023), o conhecimento das condições hidroclimáticas em regiões semiáridas é decisivo para compreender as mudanças no uso da terra e sua relação direta com a disponibilidade hídrica e o vigor vegetativo.

Nesse contexto, o sensoriamento remoto orbital emerge como uma ferramenta indispensável para a análise multitemporal e o monitoramento ambiental. O uso de índices espectrais, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), permite quantificar com precisão o impacto da variabilidade climática sobre o território, uma vez que o NDVI é amplamente reconhecido por sua eficácia no monitoramento de sistemas vegetais e na identificação de áreas sob degradação (Silva et al., 2023). A aplicação deste índice possibilita a avaliação da cobertura vegetal em diferentes escalas, revelando a relação conflituosa entre o avanço da antropização e a preservação dos recursos naturais (Xavier; Fortes, 2023).

Considerando o decênio entre 2013 e 2023, este trabalho justifica-se pela necessidade de diagnosticar como diferentes regimes hídricos influenciaram a saúde da cobertura vegetal e a severidade térmica em Patos-PB. A análise busca fornecer subsídios científicos que correlacionem a pluviosidade com a resposta termodinâmica da superfície, contribuindo para discussões sobre resiliência ambiental e planejamento urbano frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas no sertão paraibano.

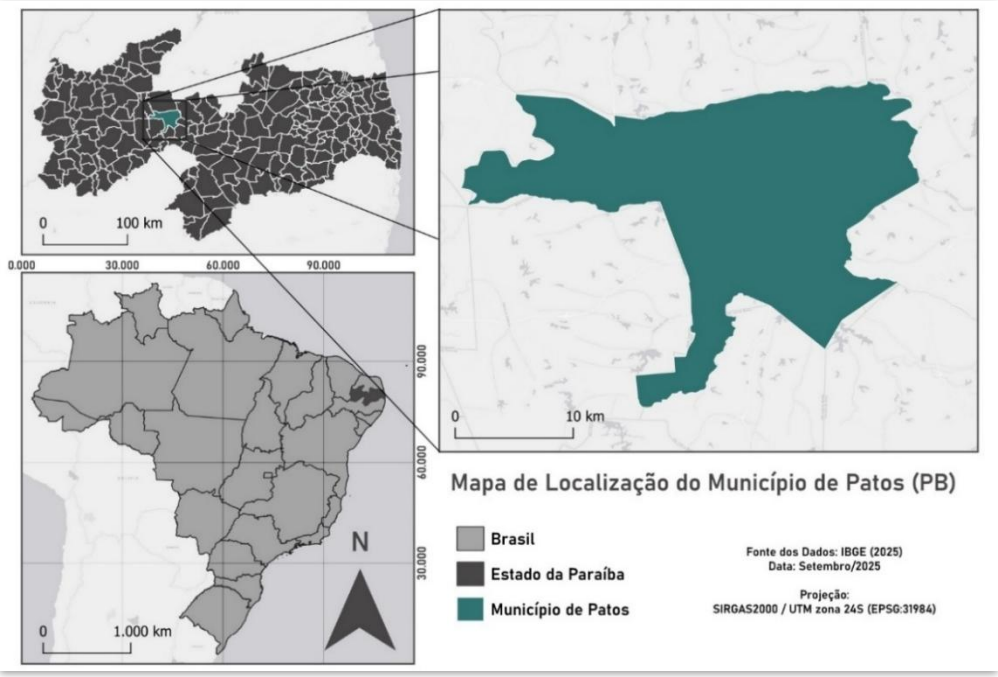


Figura 01: Mapa de Localização do Município de Patos (PB).
Fonte: IBGE (2025)

Metodologia

Este estudo adota uma abordagem quantitativa e descritiva, com base em técnicas de sensoriamento remoto orbital e análise de dados pluviométricos secundários. A pesquisa é de natureza aplicada, visando diagnosticar a influência da variabilidade hídrica sobre variáveis biofísicas da superfície (temperatura de superfície – LST – e índice de vegetação – NDVI) em escala municipal.

A seleção de imagens multitemporais do sensor Landsat permitiu a extração de índices espectrais padronizados e a geração de mapas temáticos para anos representativos do período 2013-2023: 2013 (seca extrema), 2018 (recuperação parcial pós-pulsos hídricos) e 2023 (pluviosidade próxima da média histórica). Os meses de julho e agosto foram escolhidos por corresponderem ao pico da estação seca na região semiárida paraibana, quando o estresse hídrico é máximo e os contrastes térmicos e vegetativos são mais evidentes, facilitando a detecção de respostas ambientais à precipitação acumulada no ciclo hidrológico anterior.

O processamento digital das imagens foi realizado em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) aberto (QGIS), seguindo protocolos recomendados pela USGS para dados Collection 2 Level-2, que já incluem correções atmosféricas e de superfície. A integração com dados pluviométricos da AESA permitiu correlacionar regimes hídricos anuais com as respostas termodinâmicas e vegetativas observadas. Não foram aplicadas validações de campo in loco devido à natureza exploratória e ao foco em análise multitemporal remota, mas os resultados foram comparados com padrões esperados para o bioma Caatinga em literatura especializada.

Aquisição das Imagens

Para a realização do estudo, foram obtidas gratuitamente, por meio da plataforma digital Earth Explorer, da U.S. Geological Survey (USGS), imagens em formato GeoTIFF – coleção 2, nível 2 – do sensor Landsat 8 OLI/TIRS para os anos de 2013, 2018 e 2023 (Landsat 8/9 para 2023). Para a elaboração do mapa de Temperatura de Superfície, foram utilizadas as bandas espectrais 10, correspondente ao Infravermelho Térmico; e para o de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) foram utilizadas as bandas espectrais 4 e 5, correspondentes ao Vermelho e Infravermelho Próximo. As imagens utilizadas foram filtradas para até 30% de percentual de cobertura de nuvens, correspondendo aos meses de julho e agosto.

Ano	Satélite	Data aproximada	Path/Row	% Nuvens	Fonte
2013	Landsat 8	Julho/Agosto	216/068	≤ 30%	USGS
2018	Landsat 8	Julho/Agosto	216/068	≤ 30%	USGS
2023	Landsat 8/9	Julho/Agosto	216/068	≤ 30%	USGS

Tabela 1: Características Gerais das Imagens Obtidas.
Elaboração: Autores (2026)

Processamento Digital

As imagens obtidas foram importadas para o software QGIS e cartograficamente reprojetadas do Sistema de Coordenadas WGS 84 / UTM Zone 24N para o Sistema SIRGAS 2000 / UTM Zone 25S. A conversão dos pixels de DN (Digital Numbers) para Temperatura de Superfície, seguindo os fatores de escala propostos pela USGS às imagens de nível 2, se deu por meio da aplicação da Equação (1) em calculadora raster:

$$LST = [(DN \times 0{,}00341802) + 149{,}0] - 273{,}15 \quad (1)$$

O NDVI consiste na diferença da refletância no Infravermelho Próximo (banda 5) e a refletância no Vermelho (banda 4), normalizada pela Equação (2):

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (2)$$

Após a aplicação das equações, foram realizadas correções de simbologia, onde a Temperatura de Superfície escala de tonalidades de azul para vermelho, e o NDVI de vermelho até verde, de forma respectiva do menor valor até o maior obtido.

Obtenção dos Dados Pluviométricos

A obtenção dos dados de precipitação para o município de Patos ocorreu por meio de consulta às informações disponibilizadas na plataforma digital da Agência Executiva da Gestão das Águas (AESA), referentes à Estação Metrológica AESA C-031.

Resultados e Discussão

A análise integrada dos dados orbitais e pluviométricos permitiu compreender a complexa dinâmica termodinâmica de Patos-PB ao longo do decênio 2013-2023. Nesta seção, os resultados são discutidos sob a ótica da interação biosfera-atmosfera, onde a variabilidade das chuvas atua como o principal gatilho para as transformações no vigor vegetativo e, consequentemente, no balanço de radiação de onda longa emitido pela superfície.

Variação da Precipitação

O ano de 2013 caracteriza-se como seco, registrando apenas 379,6 mm de chuva e um longo período de estiagem severa entre julho e outubro. Os dados destacam a ausência quase total de precipitação nos meses secos, com registros próximos de zero de junho a novembro, evidenciando um déficit hídrico prolongado que comprometeu severamente a recarga de solos e a manutenção da vegetação caducifólia.

O ano de 2018 acumulou um total de 489,2 mm, marcado por uma forte concentração de chuvas no primeiro quadrimestre, que corresponde a 94,5% do total, seguido por uma estiagem prolongada com seis meses sem precipitação. Observam-se picos intensos em fevereiro e março seguidos por um longo período seco, o que sugere pulsos hídricos sazonais capazes de promover regeneração vegetativa inicial, mas insuficientes para sustentar o vigor ao longo de todo o ano.

O ano de 2023 apresentou um volume anual de 765,80 mm, próximo da média histórica. No entanto, a distribuição foi irregular, com 84% do total concentrado nos primeiros cinco meses. Os índices revelam um padrão bimodal com chuvas concentradas no início do ano e uma seca moderada posterior, permitindo uma recuperação mais sustentada da vegetação em comparação aos anos anteriores, embora ainda com desequilíbrios sazonais.

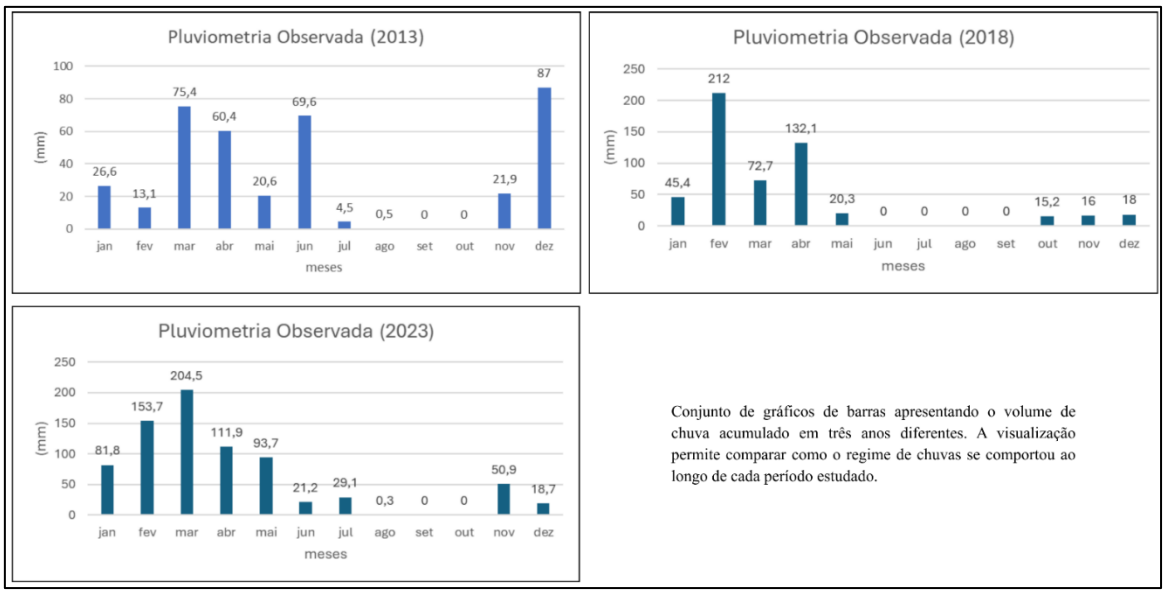


Gráfico 01: Pluviometria Observada Mensal de Patos/PB para os anos de 2013, 2018 e 2023. Fonte: AESA (2026); Elaboração: Autores (2026)

Evolução da Temperatura de Superfície

O ano de 2013 (Figura 1) se encontra em cenário de estresse hídrico extremo, proporcionando uma ampla mancha de calor cobrindo praticamente todo o município. O mapa de LST exibe tons predominantemente vermelhos e laranja intensos, com valores elevados mesmo em áreas periurbanas e rurais, indicando baixa evapotranspiração e alta absorção de radiação solar pelo solo exposto. As ilhas de calor são praticamente homogêneas, refletindo a ausência de vegetação densa capaz de modular o balanço energético da superfície.

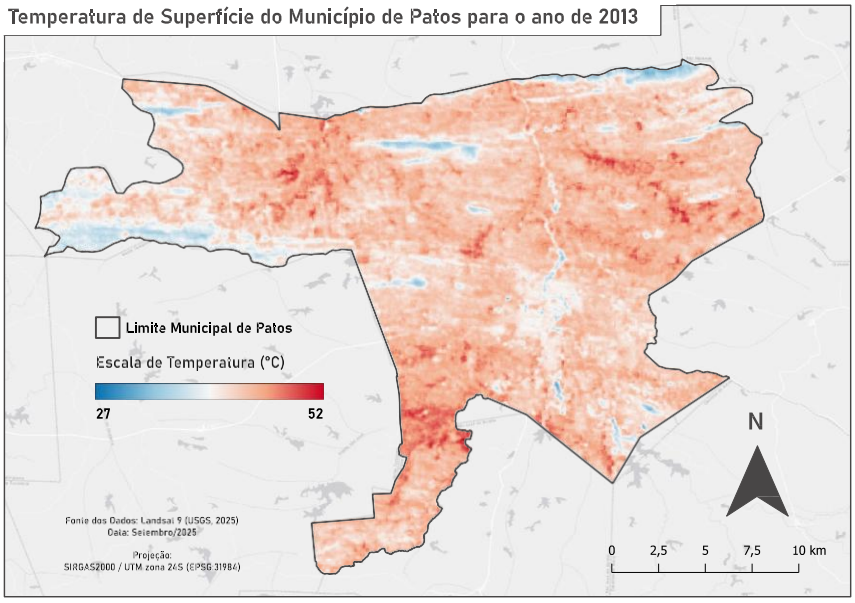


Figura 02: Temperatura de Superfície de Patos/PB para o ano de 2013.
Fonte: USGS (2025)

O ano de 2018 (Figura 2) apresenta recuperação parcial dos corpos d'água e áreas úmidas, mas a superfície ainda se encontra com altas temperaturas devido à resposta lenta da vegetação após a estiagem prolongada. O mapa mostra uma redução relativa nas áreas de vermelho intenso, com aparecimento de tons amarelos e laranja em zonas de regeneração inicial, especialmente nas proximidades de reservatórios e vales, sugerindo que os pulsos hídricos do início do ano contribuíram para um leve resfriamento localizado.

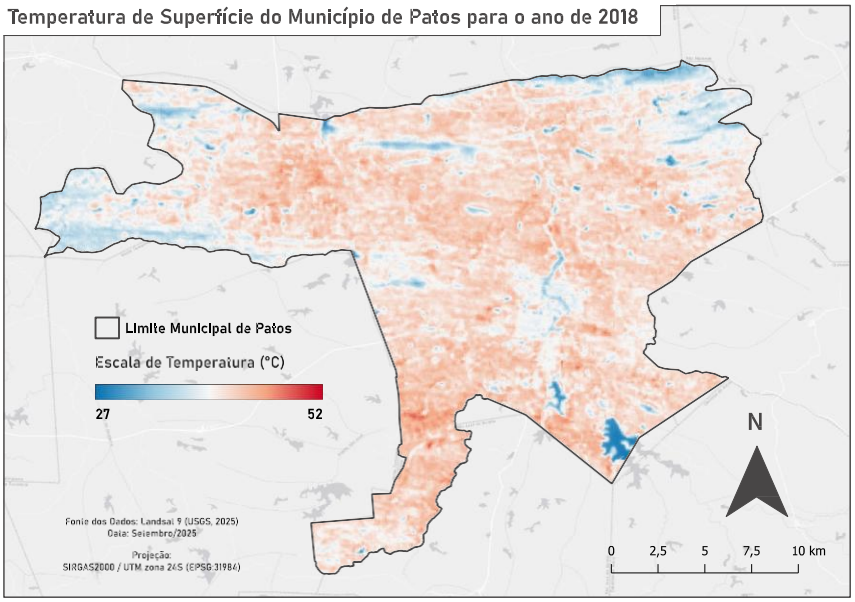


Figura 03: Temperatura de Superfície de Patos/PB para o ano de 2018.
Fonte: USGS (2025)

O ano de 2023 (Figura 3) é caracterizado por um resfriamento generalizado na superfície e uma clara fragmentação das

manchas de calor do município. O mapa revela maior diversidade de tons, com áreas azuis em regiões de maior densidade vegetal e corpos d'água, contrastando com ilhas de calor persistentes em zonas urbanizadas e expostas. Essa heterogeneidade espacial indica uma recuperação mais diferenciada, influenciada pela distribuição irregular das chuvas e pela capacidade variável de retenção hídrica do solo.

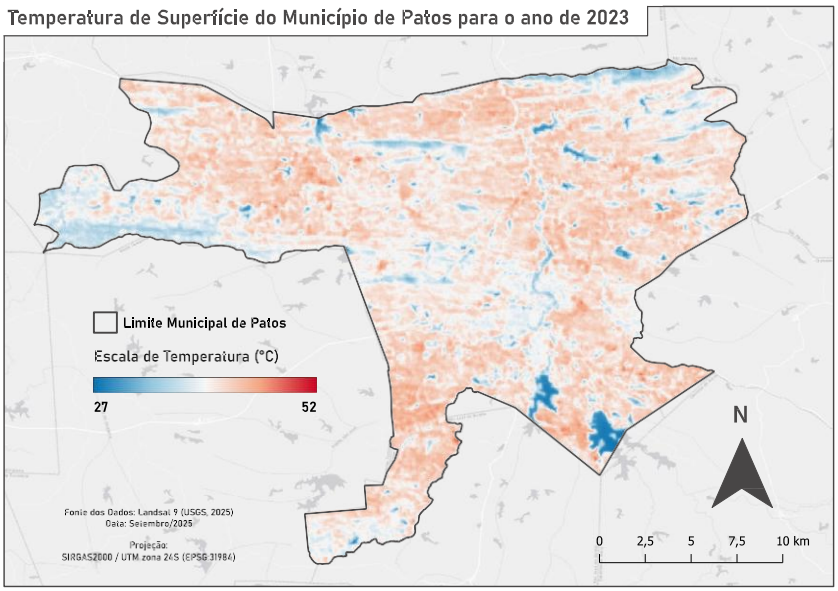


Figura 04: Temperatura de Superfície de Patos/PB para o ano de 2023.
Fonte: USGS (2025)

Evolução do NDVI

O ano de 2013 (Figura 4) apresentava baixos valores no índice NDVI, indicando vegetação escassa e seca, com baixa atividade fotossintética e grande exposição de solo. O mapa exibe tons predominantemente vermelhos e amarelos, com valores próximos de zero em vastas áreas rurais, confirmando o impacto da seca severa na perda foliar da Caatinga e na exposição do solo nu, o que agrava o aquecimento superficial.

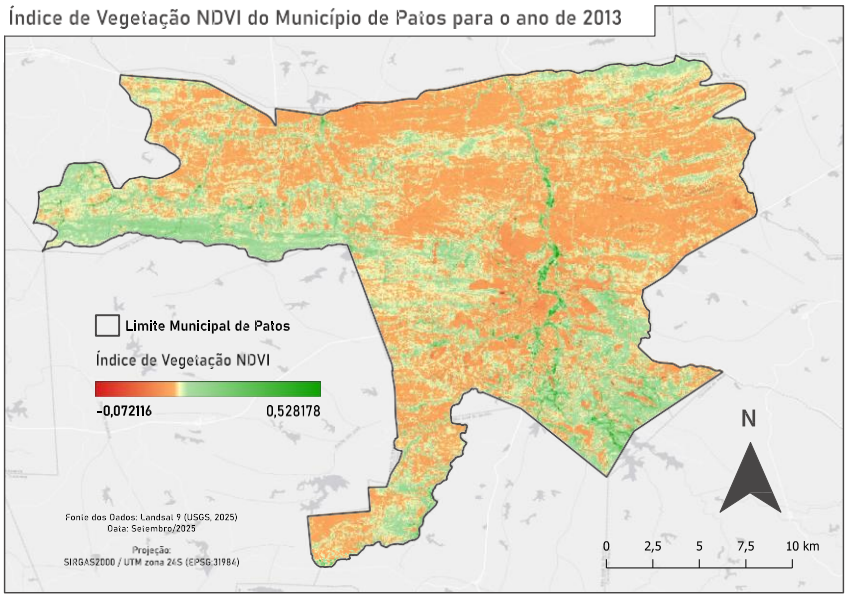


Figura 05: NDVI de Patos/PB para o ano de 2013.
Fonte: USGS (2025)

Em nítido contraste, o ano de 2018 (Figura 5) apresentava um pico de vigor e regeneração da vegetação, revelando uma expansão massiva da cobertura vegetal. O mapa mostra áreas verdes mais amplas e intensas, especialmente em vales e proximidades de reservatórios, com NDVI médio significativamente superior, evidenciando que os pulsos hídricos concentrados no início do ano foram suficientes para promover rebrotamento e aumento da biomassa foliar, mesmo com a estiagem posterior.

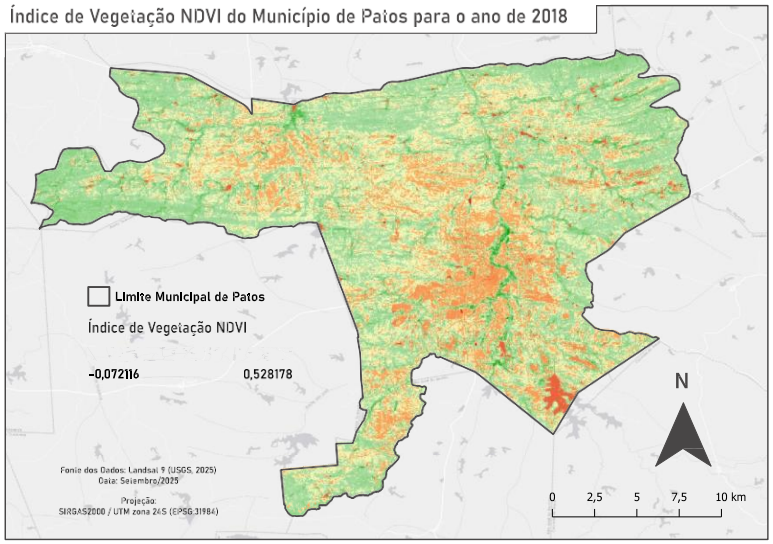


Figura 06: NDVI de Patos/PB para o ano de 2018.
Fonte: USGS (2025)

O ano de 2023 (Figura 6) exibe um cenário intermediário, ilustrando a alta variabilidade interanual do clima na região. Embora apresente uma clara retração da cobertura vegetal em comparação ao pico de biomassa de 2018, a situação se mostra significativamente superior à condição crítica de 2013, com maior presença de tons verdes em manchas fragmentadas. O mapa destaca heterogeneidade espacial acentuada, com áreas de alto NDVI concentradas em locais de melhor retenção hídrica e zonas degradadas persistindo em solos mais expostos, reforçando a influência da distribuição pluviométrica irregular.

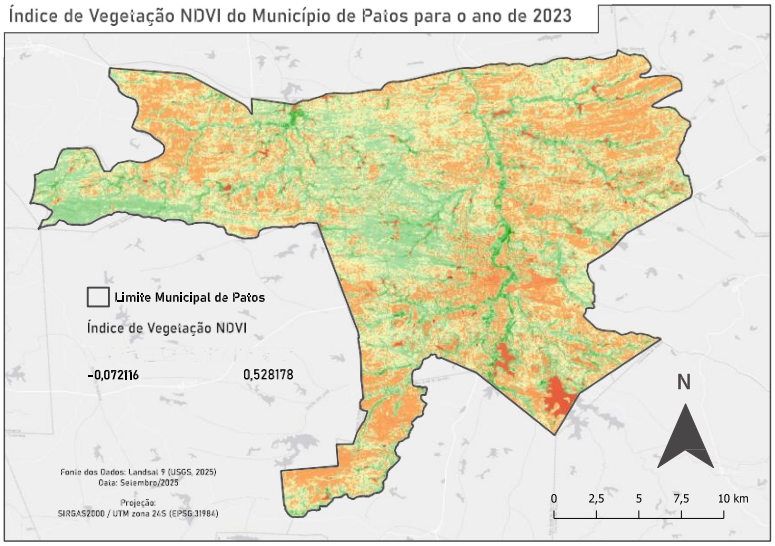


Figura 07: NDVI de Patos/PB para o ano de 2023.
Fonte: USGS (2025)

Os valores médios extraídos das imagens processadas e dos dados pluviométricos confirmam os padrões observados nos mapas temáticos. A Tabela 2 sintetiza as médias anuais de precipitação, temperatura de superfície e NDVI para os três anos analisados, permitindo uma comparação direta e quantitativa que reforça a influência da disponibilidade hídrica sobre as variáveis biofísicas da superfície. Nota-se que o aumento progressivo da pluviosidade está associado à redução da LST e ao incremento do NDVI, com maior heterogeneidade em 2023 refletindo a variabilidade espacial da recuperação vegetal.

Ano	Precipitação (mm)	LST média (°C)	NDVI médio	Observação principal
2013	379,6	42,93	0,149	Estresse hídrico extremo
2018	489,2	40,96	0,170	Pico de regeneração vegetativa
2023	765,8	40,59	~0,160	Resfriamento e maior fragmentação

Tabela 2: Valores médios de precipitação, LST e NDVI.
Fonte: Autores (2026)

Conclusão

A análise integrada dos dados revela que a chuva atua como o principal agente regulador da dinâmica climática e ambiental de Patos-PB. Em uma região onde o estresse térmico é uma condição quase permanente, a precipitação reconfigura o balanço de energia local, desviando a energia solar que aqueceria o ar para o processo de evaporação, resultando em um resfriamento crucial, ainda que transitório. A série histórica dos anos de 2013, 2018 e 2023 demonstra uma história de recuperação hídrica progressiva. O município partiu de um estado de severo estresse hídrico e térmico em 2013 e culminou em uma condição mais resiliente em 2023. A comparação dos mapas de NDVI e temperatura de superfície valida essa correlação: a maior disponibilidade hídrica não apenas expande os corpos d'água, mas também sustenta uma vegetação mais vigorosa, que, por sua vez, contribui para a mitigação das temperaturas extremas através da evapotranspiração. Fica evidente que uma recuperação substancial e generalizada dos recursos hídricos é necessária para causar um impacto significativo e efetivo no microclima de ecossistemas urbanos semiáridos.

A análise conjunta dos dados de Temperatura de Superfície (TS) e do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para os anos de 2013, 2018 e 2023 revela uma forte correlação inversa entre as duas variáveis, confirmando o papel fundamental da cobertura vegetal como reguladora do clima local.

O ano de 2013 destacou-se como o período ambientalmente mais crítico. Registrou-se a maior média de temperatura de superfície da série histórica (42,93°C) e, em correspondência direta, o menor índice de vigor vegetativo, com um NDVI médio de apenas 0,149. Este cenário sugere que a vegetação esparsa e sob estresse contribuiu para uma maior absorção de radiação solar e, consequentemente, para um aquecimento mais intenso e homogêneo da paisagem. Em contrapartida, o ano de 2018 representou um ponto de inflexão e recuperação ambiental. O NDVI médio atingiu seu pico de 0,170, um aumento de aproximadamente 14% em relação a 2013, indicando uma melhora expressiva na saúde e densidade da vegetação. Este "esverdeamento" da paisagem trouxe um benefício térmico direto, com a temperatura média da superfície caindo significativamente para 40,96°C.

Posteriormente, o ano de 2023 apresentou um cenário mais complexo. Embora a tendência de resfriamento tenha continuado, com a temperatura média atingindo o menor valor da série (40,59°C), a saúde geral da vegetação sofreu uma leve retração em comparação com o pico de 2018. O aspecto mais notável de 2023 foi o aumento da heterogeneidade da paisagem: ambos os conjuntos de dados registraram o maior desvio padrão do período, indicando um aumento no contraste entre as ilhas de calor e as áreas mais frescas, bem como entre as zonas com vegetação e as de solo exposto.

Em resumo, a análise temporal demonstra a transição de um estado uniformemente quente e com pouca vegetação em 2013 para uma paisagem mais amena, porém mais fragmentada e com maior contraste socioambiental em 2023.

Referências Bibliográficas

AB'SÁBER, Aziz Nacib. 2003. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. Ateliê Editorial. São Paulo. 159 p.

AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA - AESA. 2026. **Monitoramento Pluviométrico Mensal: Estação C-031 - Patos/PB**. Disponível em: http://www.aesa.pb.gov.br/estacoes-meteorologicas/. Acesso em janeiro de 2026.

ALVARES, Clayton Alcarde *et al*. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, dez. 2013.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2024. **Cidades e Estados: Patos, Paraíba**. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pb/patos.html. Acesso em janeiro de 2026.

LUZ, Gessica Gome da; GALVINCIO, Josiclêda Domiciano. 2023. Dinâmica do Uso do Solo, Balanço hídrico e NDVI no município de Floresta-Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 5, p. 2898-2909.

SILVA, Ellen Caroline et al. 2023. Índices de vegetação NDVI e EVI no monitoramento do cultivo da soja no município de Querência – MT, safra 2020/2021. **Revista Contexto Geográfico**, v. 8, n. 16, p. 71-84.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY - USGS. 2023. **Earth Explorer: Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 Collection**. Disponível em: https://earthexplorer.usgs.gov. Acesso em dezembro de 2025.

XAVIER, Paulo André de Almeida; FORTES, Mariane Rebouças. 2023. Aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) na bacia hidrográfica dos Educandos na cidade de Manaus - Amazonas. **Verde Grande: Geografia e Interdisciplinaridade**, v. 5, n. 2, p. 174-192.

APLICAÇÃO DA SISMOGRAFIA COMO FERRAMENTA DE MONITORAMENTO GEOTÉCNICO: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ROCHAS CARBONÁTICAS E ITABIRÍTICAS

1 Gleison da Silva Pereira

Coordenação de curso de Engenharia de Minas, gleisongeo6@gmail.com; Professor orientador: Luiz Carlos da Cruz

Palavras-chave: Sismografia. Geotecnia. Vibrações. Monitoramento. Estruturas.

Resumo

O presente estudo tem como objetivo demonstrar a importância da sismografia como ferramenta de monitoramento geotécnico e como as ondas se comportam em dois tipos de rochas. Foram Monitoradas duas áreas distintas, uma composta por rocha carbonática compacta (Pedreira Janaúba) e outra por minério de ferro do tipo itabirito friável (Mina Lopes Itabiritos), a fim de comparar a propagação e atenuação das ondas sísmicas geradas pelas operações e pelos desmontes. O método consistiu no uso de sismógrafos de engenharia da marca White Industrial Seismology, Inc., para registrar as vibrações em diferentes pontos, incluindo cavidades naturais, poços e estruturas civis. Os resultados mostraram que rochas compactas possuem maior velocidade de propagação e menor atenuação das vibrações, enquanto rochas friáveis e porosas apresentam comportamento dissipativo, devido à sua estrutura interna e ao grau de fraturamento. Observou-se também que a ausência de padronização de limites nacionais de PPV (Velocidade de Partícula de Pico) e de parâmetros específicos para diferentes litologias evidencia a necessidade de criação de uma norma técnica nacional voltada ao tema. Conclui-se que a integração da sismografia à geotecnia é essencial para aumentar a segurança operacional, prevenir rupturas estruturais e compreender o comportamento dinâmico das rochas frente às atividades industriais.

Introdução

O avanço das atividades industriais e minerárias tem ampliado os riscos de vibrações no solo, principalmente nas aéreas das plantas industriais e exigindo novas estratégias de monitoramento geotécnico capazes de avaliar os impactos dessas vibrações sobre estruturas naturais e construídas (DOWDING, 1996; ABNT, 2020). A sismografia, tradicionalmente aplicada ao estudo de terremotos (BOLT, 1988), tem se mostrado uma ferramenta essencial também para o monitoramento de vibrações induzidas por detonações, escavações e operações pesadas de mineração (ISEE, 2015).

O presente estudo investiga a aplicação da sismografia como instrumento de monitoramento geotécnico em dois contextos distintos: a Pedreira Janaúba, composta por rochas carbonáticas compactas, e a Mina Lopes Itabiritos, localizada na Serra da Moeda, formada por minério de ferro do tipo itabirito friável (RIBEIRO et al., 2021). O objetivo é compreender como diferentes tipos litológicos influenciam na percolação, atenuação e intensidade das ondas sísmicas e estabelecer parâmetros que auxiliem na definição de limites seguros de PPV (Velocidade de Partícula de Pico) (WANG; NUR, 2015).

A importância desta pesquisa está em demonstrar que o comportamento sísmico das rochas varia conforme sua composição, densidade, porosidade e grau de fraturamento, fatores que determinam a forma como as vibrações se propagam e afetam as estruturas vizinhas (WANG; NUR, 2015; HOEK; BROWN, 1997). Além disso, busca-se reforçar a necessidade de criação de uma norma nacional específica para o controle das vibrações do terreno, visto que a atual ABNT NBR 9653:2020 aborda apenas limites gerais para áreas de desmonte, sem considerar as particularidades geotécnicas e estruturais de cada tipo de rocha (ABNT, 2020).

Assim, este trabalho contribui para a ampliação do conhecimento técnico sobre o uso da sismografia na engenharia geotécnica, propondo sua adoção como ferramenta contínua de monitoramento e prevenção de riscos estruturais e ambientais (DOWDING, 1996; WANG; NUR, 2015).

Referencial Teórico

A ABNT NBR 9653:2020 é a principal referência brasileira no controle de vibrações do terreno em áreas urbanas e não urbanas. Essas vibrações são monitoradas por sismógrafos, utilizados como instrumentos de controle e conformidade com as regulamentações estabelecidas, com o objetivo de evitar danos a propriedades urbanas, industriais, formações naturais (como cavernas) e lesões a pessoas. De acordo com o ISEE, International Society of Explosives Engineers (2015), o objetivo das práticas de campo descritas em suas diretrizes (Field Practice Guidelines for Blasting Seismographs) é garantir o registro consistente e preciso das vibrações do solo e da sobrepressão atmosférica por meio do uso de sismógrafos de monitoramento.

Segundo Senossian (2004), o sismógrafo é um instrumento utilizado para registrar vibrações e ondas sísmicas que se propagam pelo solo. Já a sismografia, conforme definição do Dicionário da Língua Portuguesa, é a ciência que estuda os sismos, resultantes da liberação súbita de energia que provoca movimentos na superfície terrestre. O monitoramento das vibrações do solo é essencial como medida de controle de risco geotécnico, prevenção de danos patrimoniais e redução de riscos à integridade das pessoas. As vibrações no solo são oscilações elásticas que se propagam por meio das rochas ou solos a pós a liberação de energia, seja por causas naturais ou artificiais (BOLT, 1988).

De acordo com Brandi et al. (2015), as ondas sísmicas geradas pelas detonações de explosivos nas operações de mineração constituem o principal parâmetro a ser considerado na avaliação dos impactos vibracionais. A avaliação do risco de dano em edificações próximas a áreas de vibração deve se basear na Velocidade de Partícula de Pico (PPV, Peak Particle Velocity), medida pelos sismógrafos, e na frequência predominante da vibração, comparando, as com limites recomendados em normas técnicas, conforme enfatizado por Dowding (1996, p. 42).

A sismografia é atualmente utilizada para o monitoramento de vibrações no solo, visando proteger e mitigar danos. Para isso, são empregados sismógrafos de engenharia, equipamentos disponíveis no mercado em diversas marcas, mas com componentes essenciais em comum: geofone, responsável por medir a vibração do solo (ondas sísmicas), e um microfone, utilizado para registrar o deslocamento do ar.

Esses equipamentos possuem um valor ajustável manualmente, denominado "trigger", que representa o limiar de sensibilidade definido pelo profissional. A partir desse valor, o sismógrafo inicia o monitoramento das vibrações, gerando um sismograma um registro gráfico e digital das ondas captadas, mostrando a amplitude do movimento em função do tempo (BOLT, 1988, p. 25). O Brasil, assim como outros países, não possui uma geologia uniforme, mas sim uma ampla variedade de tipos de rochas, cada uma com propriedades mecânicas e físicas distintas. Essa diversidade altera significativamente o comportamento das vibrações no maciço rochoso em função das atividades industriais.

A propagação de ondas sísmicas é fortemente influenciada pelas propriedades mecânicas e físicas intrínsecas de cada tipo de rocha como elasticidade, densidade, porosidade, textura e presença de fraturas de modo que rochas diferentes conduzem ou atenuam vibrações de maneiras distintas (WANG et al., 2015 apud Seismic Wave Propagation and Rock-Fluid Properties). A sismografia permite compreender o comportamento das ondas no solo, não apenas para fins de pesquisa sísmica, mas também como ferramenta de monitoramento geotécnico. Por meio dela, é possível avaliar como taludes, barragens, poços e estruturas vizinhas estão sendo impactados por vibrações e se possuem resistência suficiente para suportar tais esforços.

O Brasil apresenta inúmeras obras e atividades em áreas urbanas, muitas delas geradoras de vibrações, se não forem monitoradas, podem futuramente causar danos estruturais em prédios, viadutos ou taludes e dentro das próprias áreas de mineração. É essencial compreender que um talude composto por determinado tipo de rocha será capaz de suportar o "estresse" provocado por ondas sísmicas atuando continuamente.

Ao unir diferentes métodos de monitoramento, como radares, prismas e piezômetros, aumentamos a efetividade das investigações, uma vez que são igualmente importantes e indispensáveis. Entretanto, esses instrumentos apenas indicam se houve ou haverá deslocamento da massa monitorada, sem fornecer dados sobre a resistência da estrutura às vibrações que ela sofre.

O registro sismográfico permite essa análise, desde que sejam considerados parâmetros como tipo de rocha, tipo de obra e distância entre a fonte vibratória e a estrutura afetada.

Existem normas que definem limites de PPV (velocidade de partícula de pico) para diferentes tipos de estruturas. A DIN 4150-3, da Alemanha, é amplamente citada para controle de vibrações e estabelece que:

- 20 a 50 mm/s – para edifícios comerciais e industriais;
- 4 a 20 mm/s – para edifícios residenciais;
- 3 a 10 mm/s – para edificações sensíveis a vibrações (com grande valor intrínseco).

Trata-se, contudo, de uma norma não conservadora, pois não especifica distâncias nem considera o tipo de rocha ou solo sobre o qual a estrutura está apoiada.

Já o United States Bureau of Mines (USBM), no relatório RI 8507, é uma referência histórica no contexto de detonações e vibrações em mineração. Segundo esse documento:

"Os limites de vibração do solo para prevenção de trincas cosméticas (em casas de 1 ou 2 pavimentos) variam conforme a frequência dominante, com valores de 12,7 mm/s a 19,0 mm/s para edificações em alvenaria com reboco ou paredes de drywall."

Esse documento é mais conservador, porém também apresenta poucos detalhes sobre o tipo de estrutura e sua fundação, destacando que o limite deve depender das características da rocha, do solo e do tipo construtivo.

No Brasil, a ABNT NBR 9653:2020, norma de controle de vibrações por detonações, é amplamente utilizada como referência, embora não estabeleça limites universais de PPV para todas as estruturas. Ela define valores aplicáveis ao entorno de detonações em pedreiras e áreas de desmonte. Trabalhos acadêmicos indicam que:

"A NBR 9653 definiu 15 mm/s como o limite máximo de vibração permissível nos arredores das áreas onde ocorrem detonações de rocha." Neste contexto, a norma não detalha os diferentes tipos de estruturas ou condições geotécnicas como taludes, fundações e maciços, revelando a necessidade de estudos mais aprofundados no contexto brasileiro.

Em 2004, foi sancionada a Resolução CONAMA nº 347/2004, com o objetivo de atualizar o Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico. Essa resolução determinou que, até que estudos específicos definam a área de influência de uma cavidade natural, ela deve ser considerada como sua projeção horizontal acrescida de um entorno de 250 metros valor amplamente questionado pela indústria.

Segundo Dutra (2017), essa distância surgiu de um arbitramento informal, quando um cidadão que pretendia arrendar um terreno estipulou o raio de 250 metros como base para cálculo de impostos, alegando que seria um "raio seguro" em relação às cavidades e, a partir disso, o valor permaneceu adotado nas regulamentações (Tabela 1)

Faixa de Frequência	Limite de velocidade de vibração de partícula de pico
4 Hz a 15 Hz	Iniciando em 15 mm/s, aumenta linearmente até 20 mm/s
15 Hz a 40 Hz	Acima de 20 mm/s, aumenta linearmente até 50 mm/s
Acima de 40 Hz	50 mm/s
NOTA: Para valores de frequência abaixo de 4 Hz, deve ser utilizado como limite o critério de deslocamento de partícula de pico de no máximo 0,6 mm (de zero a pico).	

Tabela 1 - Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência

A ABNT, em sua tabela acima, mostra que, se a frequência for menor, a estrutura é mais sensível e precisa de um PPV menor. Se a frequência for alta, a estrutura tolera vibrações maiores sem danos.

Porém, esses critérios precisam ser estudados com maior atenção. Como citado nos textos anteriores, o tipo de rocha pode influenciar na atenuação das vibrações, e cada estrutura possui sua característica mecânica de resistência. Essa tabela da ABNT é um apanhado geral de referência, mas ainda não existem estudos aprofundados que apresentem detalhes sobre o comportamento das ondas em maciços e estruturas industriais.

Haverá estruturas que necessitarão de monitoramento contínuo enquanto o empreendimento estiver em operação e outras que exigirão apenas monitoramentos pontuais. Entretanto, é indispensável o desenvolvimento de estudos mais aprofundados para determinar até que ponto podemos ou não ser conservadores em relação aos valores de PPV.

A NBR 9653 é voltada principalmente para operações de desmonte, necessita de mais detalhes ou até mesmo de uma nova norma mais específica sobre os limites de PPV aplicáveis às estruturas em território nacional. Assim como surgiram novas leis voltadas para barragens após os eventos recentes, o estudo e o monitoramento das vibrações do terreno na geotecnia devem se tornar uma prática constante. Esse tema será aprofundado ao longo deste estudo.

Metodologia

Neste estudo, foram utilizados alguns sismógrafos da marca White Industrial Seismology, Inc., compostos por um geofone que realiza as medições de vibrações do terreno em três direções, sendo elas: vertical, transversal e longitudinal, conforme figura 1. Um desses sismógrafos foi instalado na entrada de uma cavidade, na PA 14 da Pedreira Janaúba. Já na Lopes Itabiritos, há sismógrafos instalados internamente devido à necessidade de monitoramento 24 horas dentro das cavidades. Também foram instalados sismógrafos em um poço no fundo da cava e no viaduto da BR-040, a fim de medir quais impactos essas estruturas estão sofrendo. Esses aparelhos foram instalados trinta minutos antes do desmonte e retirados após a confirmação de desmonte encerrado. Esse período também é aplicado para outras fontes geradoras de vibração, como máquinas, trânsito de caminhões e escavação, conforme figura 2. Este estudo também reforça a necessidade de uma norma nacional fundamentada em pesquisas sobre o comportamento vibracional de diferentes tipos de rocha, servindo como base orientativa para empreendimentos que envolvam patrimônios espeleológicos, urbanos e industriais.

Para isso, foi conduzida uma análise técnica comparativa em duas minas: uma mina de calcário (Pedreira Janaúba) e uma mina de ferro (Lopes Itabiritos).



Figura 1: Sismógrafo Mini-Seis. Fonte: White Industrial Seismology

Os monitoramentos geraram relatórios em PDF no formato de sismogramas, que foram baixados digitalmente em porta USB a partir da memória dos equipamentos. Foram realizados monitoramentos em poços, cavidades, taludes e estruturas industriais em dois tipos de rocha analisados. É importante destacar que o monitoramento foi conduzido de acordo com os pontos de monitoramento individual de cada proprietário das mineradoras, considerando que cada empresa possui áreas distintas, minério de ferro e calcário.

O monitoramento ocorreu com distâncias variadas, em função do porte de cada mina e da localização das estruturas monitoradas, com o objetivo de evitar anomalias geotécnicas e danos irreparáveis ao patrimônio.

Após o término do monitoramento, foram reunidos todos os dados obtidos em campo, incluindo registros dos sismógrafos, sismogramas, planos de fogo (ou planos de desmonte) e atividades operacionais principais ocorridas nas mineradoras. Também foram consideradas as atividades secundárias de carga e transporte, que também geram vibrações devido ao peso dos equipamentos e às escavações nas fontes emissoras, como, por exemplo:

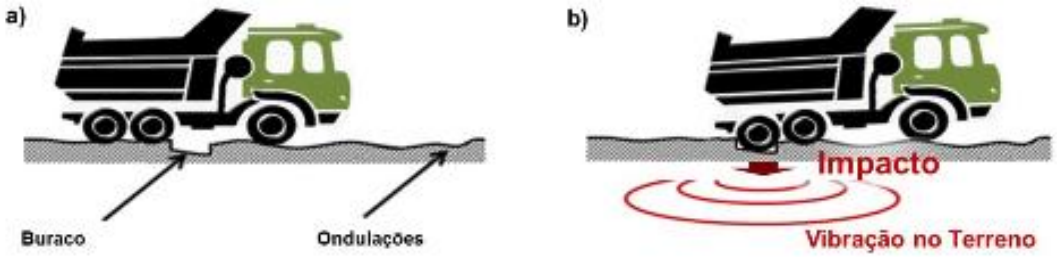


Figura 2: Fonte geradora. Fonte: Sismografia CECAVE

Foram instalados os sismógrafos com os procedimentos normativos de instalação para monitoramento da principal atividade das mineradoras o desmonte da rocha. (Figura 3).



Figura 3: Cavidade PA 14. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Resultados e Discussões

1. PEDREIRA JANAÚBA



Figura 4: Mapa geral da Pedreira Janaúba. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Pedreira Janaúba, o cenário ao redor do empreendimento compreende as seguintes estruturas naturais espeleológicas: PA-08, PA-09 e PA-14. Contudo, apenas a estrutura natural PA-14 foi monitorada no presente estudo (Figura 5).

O cenário operacional da Pedreira Janaúba, a única atividade com maior fonte de emissão de vibrações com potencial de dano às estruturas, tanto industriais quanto naturais, é o desmonte de rocha para produção de agregados. As demais atividades operacionais de carga e transporte são de baixa amplitude, pois estão em área distante em relação às estruturas naturais.

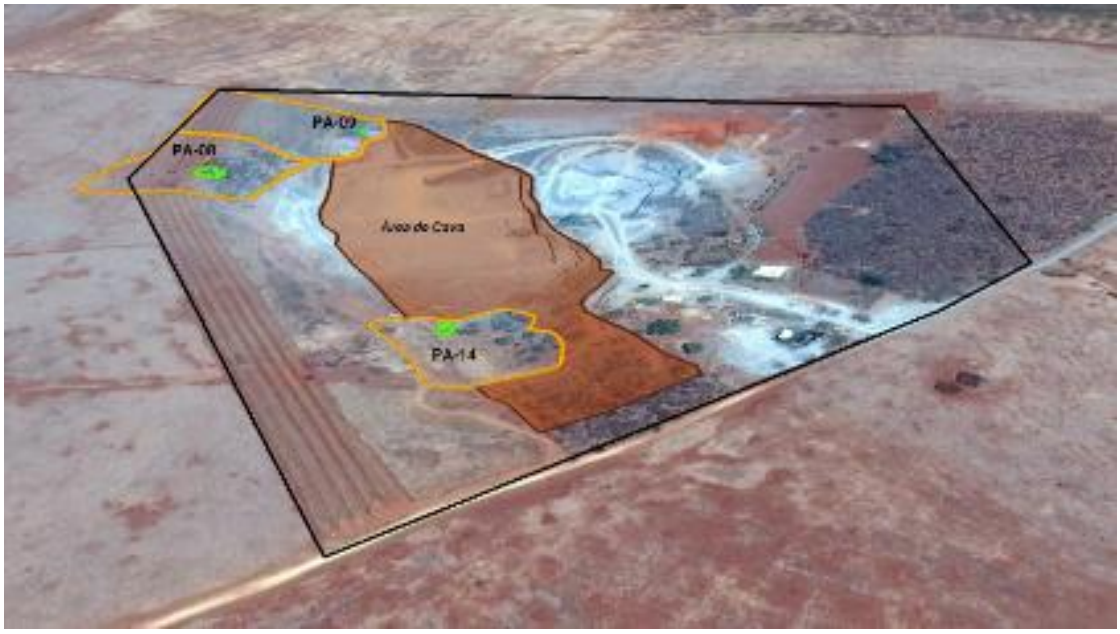


Figura 5: Imagem tridimensional do entorno da mina. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Pedreira Janaúba, não disponibilizou todos os arquivos de seus domínios, mas sim dados relevantes para discussão e resultado do estudo obtidos pelos monitoramentos na cavidade PA 14 (Tabela 2).

1.2 Contextualização da mina Pedreira Janaúba

O estudo reporta os resultados das vibrações do terreno relacionados a atividade principal da Pedreira Janaúba que é o desmonte de rocha, porém estas atividades controladas e não controladas geram impactos e precisam ser monitoradas, afim de mensurar valores para realizar este estudo de valores de vibração para proteção das estruturas no caso as cavernas e segurança das pessoas e do empreendimento, o entendimento das ondas no terreno relacionado as rochas carbonáticas é muito importante para sabermos mais sobre qual "estresse" vibracional esta rocha vem sofrendo.

Normas como a DIN 4150-3 para edifícios industriais e comerciais determina valores aceitáveis em vibrações de 20mm/s a 50mm/s.

Estudos específicos em maciços calcários mostram que o aumento da densidade de fraturas reduz a velocidade sísmica em calcários, retardando a propagação das ondas (HANDOKO et al., 2018), por outro lado, rochas carbonáticas compactas tendem a apresentar alta velocidade sísmica, caracterizando meios eficientes de transmissão de energia.

Identificação do Ponto de Monitoramento	Dados dos Desmontes de Rocha		Dados do Monitoramento Sismográfico		Resultados do Monitoramento Sismográfico			
	Identificação do Desmonte de Rocha	CME (kg)	Distância do Desmonte ao Ponto de Monitoramento	Distância Escalonada $\left(\frac{m}{\sqrt{kg}}\right)$	Transversal (mm/s)	Vertical (mm/s)	Longitudinal (mm/s)	PPV (mm/s)
PA-14	DR1	168	243 metros	19	13,2	19,1	14,2	19,1
	DR2	128	225 metros	20	39,1	27,9	16,8	39,1
	DR3	168	331 metros	25	16,3	17,3	5,8	17,3
	DR4	88	86 metros	9	14,4	41,7	19,3	41,7
	DR5	84	99 metros	11	13,2	54,4	23,4	54,4
	DR6	68	246 metros	30	4,7	7,9	5,2	7,9

Tabela 2 - Resultado dos monitoramentos. Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados da vibração (PPV) descrito na (Tabela 2) indicam níveis elevados se comparando a norma utilizada ABNT apenas de referência geral, ultrapassando os valores de 15 mm/s, no caso da PA 14 indicam níveis maiores nos cinco primeiros monitoramentos com destaque o DR5. (Figura 6).

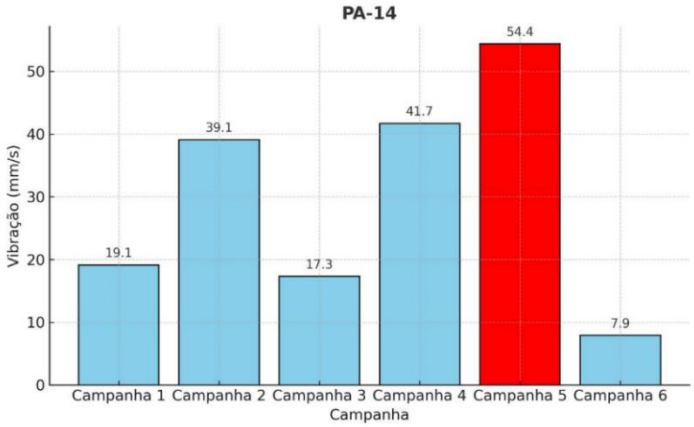


Figura 6: Resultados dos monitoramentos sismográficos na PA 14. Fonte: Autor

Conforme estabelecida pela agência do governo norte americano United States Bureau of Mines o método adotado faz referência a lei de propagação sísmica, com os resultados aderidos da região do estudo, (Figura 7).

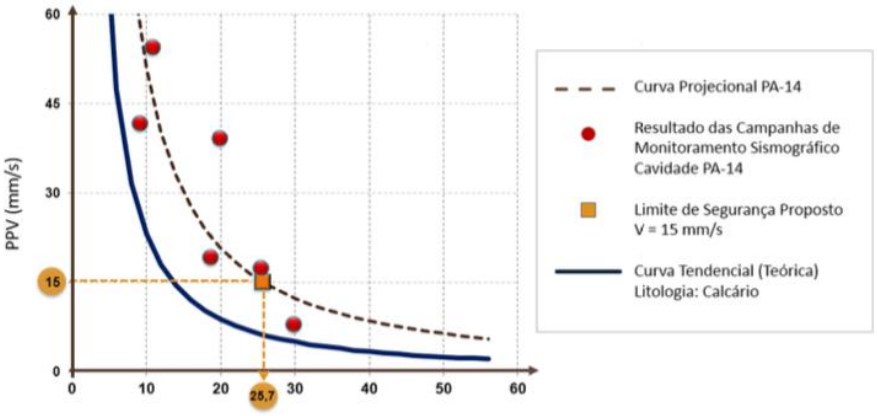


Figura 7: Imagem de distância escalonada PA 14. Fonte: Elaborado pelo Autor

A distância de 100 m entre a frente de desmonte e a cavidade PA-14, a carga máxima por espera (CME) admissível para os desmontes de rocha na Pedreira Janaúba é da ordem de 15 mm/s adotado para a velocidade de partícula de pico (PPV). Observa-se uma dispersão significativa dos dados obtidos durante o monitoramento em relação às curvas projetadas de atenuação. Esta variação é esperada, pois o comportamento sísmico depende de vários fatores locais, como características litológicas e situações geomecânicas do maciço. A rocha fonte da mina Pedreira Janaúba é o calcário, uma rocha sedimentar carbonática composta predominantemente por calcita (CaCO3), podendo variar entre, compacta, maciça, porosa e fraturada, o conhecido calcário cárstico.

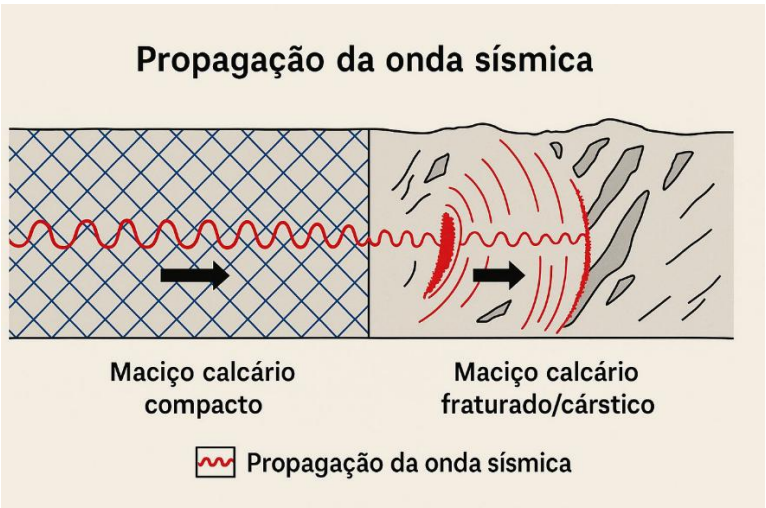


Figura 8: Propagação da onda sísmica. Fonte: Elaborado pelo Autor

Na figura 8 observa-se a atenuação de ondas sísmicas em amostras de rochas carbonáticas e conclui que as rochas com maior densidade de fraturas ou cavernas apresentam taxas mais elevadas de atenuação, ou seja, a amplitude das ondas decai mais rapidamente, em particular, a presença de heterogeneidades como cavidades ou fraturas age como mecanismos de dispersão e reflexão, (Seismic Wave Attenuation in carbonates-Adam L., 2009).



Figura 9: Carregamento do desmonte



Figura 10: Desmonte.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Nas duas imagens acima, Figura 9 e Figura 10, observa-se uma situação de calcário maciço com cobertura argilosa residual.

O Projeto Bambuí confirma a presença de maciços carbonáticos compactos em Janaúba e Monte Azul, com ocorrência de manto argiloso residual proveniente de dissolução química (CPRM, 2010), fato também confirmado em campo conforme ilustrado na Figura 9.

De acordo com o monitoramento e as análises apresentadas nas Tabela 2 e Figura 8, a dispersão dos resultados está diretamente associada a diversos fatores, dentre eles: a variabilidade litológica do maciço rochoso, um fator não controlável; a topografia, já que se trata de uma região de relevo baixo e pouco irregular, contribuindo para a propagação das ondas oriundas das operações na fonte monitorada; o plano de fogo e de perfuração mal elaborados, representa um fator parcialmente controlável. A empresa, por sua vez, precisa atingir uma granulometria específica para viabilizar o processo de britagem, cargas muito baixas por furo resultam em blocos grandes, capazes de ultrapassar o limite do britador. Distâncias entre os pontos também devem ser avaliadas.

Correlacionando este estudo, tem-se uma base segura para afirmar que as ondas provenientes de desmontes em rochas carbonáticas não fraturadas e outras operações que gerem vibrações no solo tendem a se propagar com maior velocidade em rochas carbonáticas maciças. No entanto, o valor de PPV (velocidade de partícula de pico), alto ou baixo, depende do nível de controle operacional e da capacidade das estruturas em suportar tais vibrações. A estrutura natural no caso a PA 14 sofreu um PPV de 54,4 a cem metros, com carga por furo de 84 (kg), ultrapassando os valores estipulados pela ABNT:9653.

O DR6 na tabela 2, aumentou a distância e diminui a carga (CME), obteve PPV de 7,9, não existe um equilíbrio nem padronização de distância nem de quantidades de furos, para melhor análise e definição do quanto esta estrutura pode suportar de limite de PPV, além de 15 mm/s é possível, pois a estrutura está intacta, contando também que depende da frequência que esta estrutura recebe este “stress” das vibrações.

2. LOPES ITABIRITOS

Referente ao estudo, tanto comparativo quanto determinante, no quesito vibração em dois tipos de rochas sendo elas o calcário e o minério de ferro do tipo itabirito, buscou-se determinar o fator de segurança geotécnica com o uso da sismografia, como base para o desenvolvimento de uma nova norma nacional e para o monitoramento constante, a fim de identificarmos quais vibrações estão sendo transmitidas a essas estruturas.

A mineradora Lopes Itabiritos auxiliou neste estudo. O compartilhamento de dados foi realizado de forma diferente da Pedreira Janaúba, o que é compreensível devido à Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018, Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD).

A mineradora está situada em Itabirito, na Serra da Moeda, onde foi realizado o monitoramento utilizando sismógrafos da marca White a mesma utilizada na Pedreira Janaúba, nos seguintes pontos das estruturas monitoradas: Poço-12, Viaduto BR-040 e cavidades VL-48 e VL-53 (Figura 11 e 12).

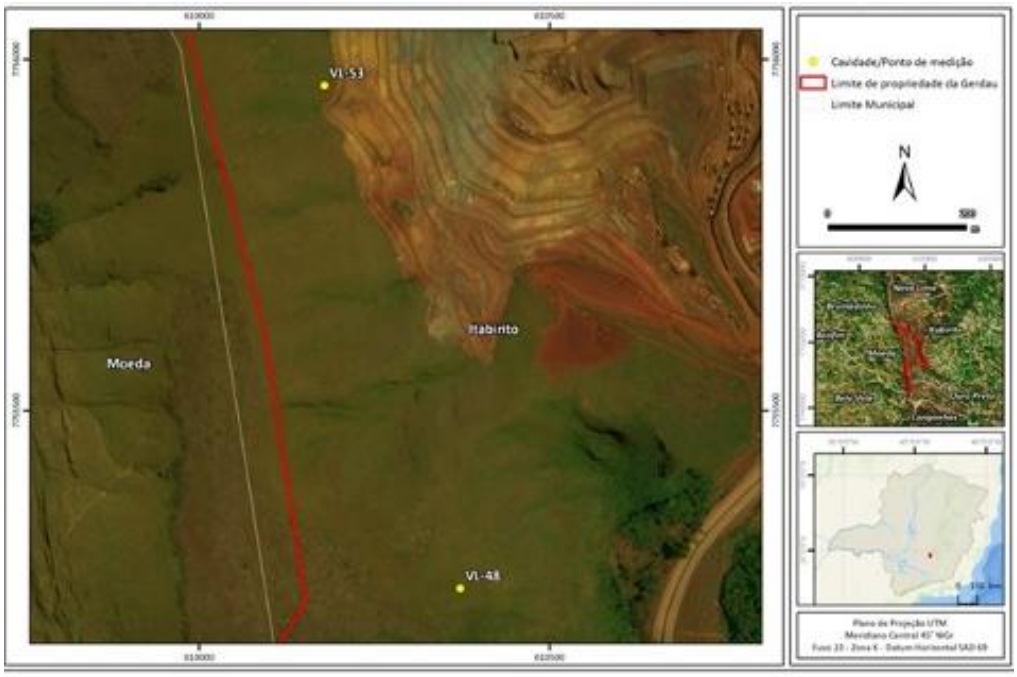


Figura 11: Mapa de cavidades. Fonte: Elaborado pelo Autor

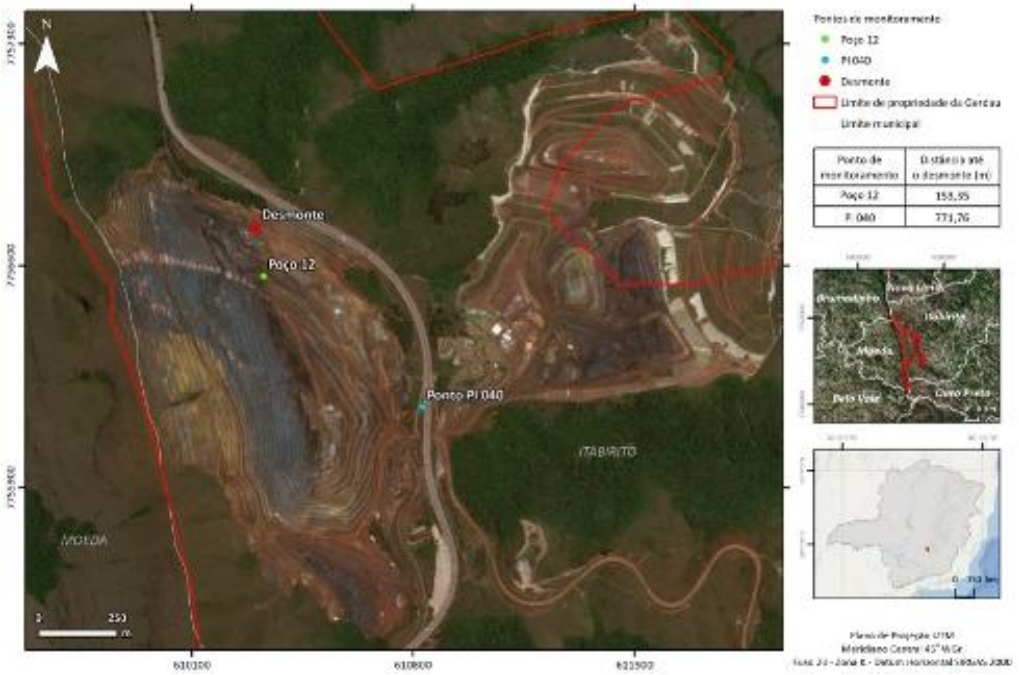


Figura 12: Mapa do poço e do Viaduto PI040. Fonte: Elaborado pelo Autor

2.1 Contextualização da mina Lopes Itabiritos

O estudo reporta os resultados das vibrações do terreno relacionadas ao desmonte de rochas por explosivos na Mina Lopes Itabiritos. O monitoramento foi realizado em dois pontos determinados pela Lopes, com o objetivo de identificar qual "estresse" em PPV essas estruturas estão sofrendo, a fim de conhecer o comportamento das vibrações em estruturas geotécnica civil de concreto e em um poço de rebaixamento, cujas paredes podem sofrer danos internos caso a vibração das operações ultrapasse valores que a rocha ou o concreto não possam suportar.

Sobre estruturas de concreto, a DIN 4150-3, para edifícios industriais e comerciais, o valor de PPV aceitável em vibrações de curto prazo varia de 20 mm/s a 50 mm/s, para a faixa de frequência de 1 a 10 Hz.

No que se refere ao minério de ferro itabirito friável, que é o caso da Lopes Itabiritos, Ribeiro et al. (2021) apontam que, para rochas friáveis provenientes da alteração de itabirito no Quadrilátero Ferrífero, a porosidade varia de 15% a 55%. Isso demonstra uma variação física significativa da rocha, que pode influenciar fortemente a propagação das vibrações, embora o estudo não defina limites de PPV específicos.

Conforme a geologia da Mina Lopes Itabiritos e Ribeiro et al. (2021), existem itabiritos friáveis definidos para a região, com composições anfibolíticas, denominados na operação como “Itabirito Amarelo”. Trata-se de uma rocha porosa e friável, com alta capacidade de dispersar vibrações, mas também sensível à recepção dessas ondas. Devido ao seu plano geomecânico, é facilmente suscetível a deslizamentos caso as vibrações não sejam devidamente controladas dentro dos parâmetros de estabilidade geotécnica. Essa condição pode fazer com que os bancos percam estabilidade, aumentando as forças que favorecem a ruptura, podendo resultar em falha global da estrutura. Como exemplo observam-se as Figuras 13 e 14.



Figura 13: Plano geomecânico Lopes Itabiritos. Fonte: Elaborado pelo Autor

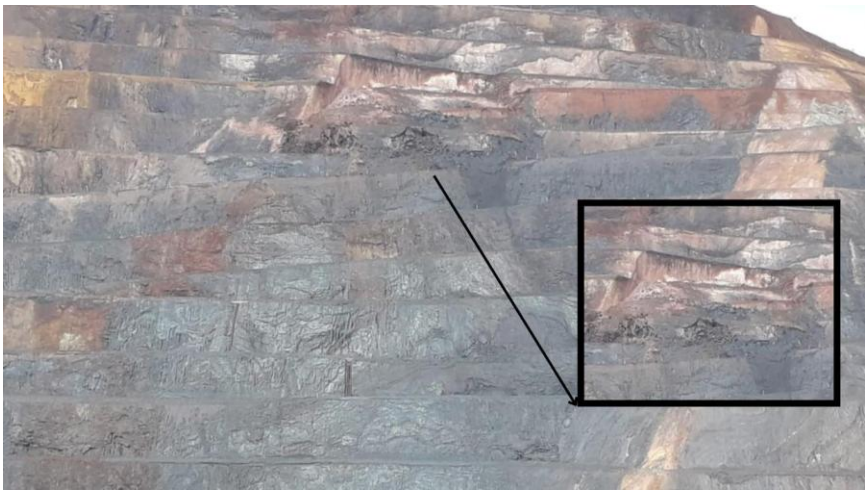


Figura 14: Ruptura global Lopes Itabiritos. Fonte: Elaborado pelo Autor

Esta situação não gerou acidente de trabalho humano e material, pois o radar detectou a ruptura, porém se tivéssemos monitoramento e conhecimento das vibrações nestes taludes não apenas iriamos detectar o rompimento como o radar realizou mas sim evitar a ruptura, quem sabe por quanto tempo esta rocha já não estava sofrendo o “estresse” vibracional, além do suportado, na geotecnia, nenhuma anomalia que gere ruptura ocorre sem a rocha avisar, se ela é bem monitorada é possível evitar e corrigir a tempo, isso evita custos operacionais, perca de bancos importantes ou até mesmo vidas.

3. POÇO 12 E PI O40

Foram definidos para esta campanha dois pontos pela Lopes Itabiritos para instalação dos sismógrafos, conforme (Figura 12).

A mina realizou um desmonte em rocha compacta estéril por explosivos, a citação “por explosivos” se dá devido a mina também realizar desmonte mecânico, ou seja, escavação sem necessidade de desmonte, devido ao tipo de rocha, plano de fogo (Tabela 3)

PARÂMETROS GERAIS PARA CARREGAMENTO									
Banco / área	1280			Fogo Nº		007/2019	Rocha:	Estéril	
Nº de furos	399			Diâmetro (pol)		3,5	Inclinação (º)	0	
Altura banco (m)	10,00			Média de perfuração (m)		8,0	Sub.furação (m)	0,5	
Afastamento	1,90			Total Desmontado (t)		55.615,36	Dens. Rocha	3,2	
Espaçamento	3,00			Total Explosivos (kg)		15.540	Dens. Méd. Expl.(encartuchado)	1,15	
Metros planejados	3057,30			RL. de carga prev. (kg/m)		7,14	RC.Final (g/m³)	894,1	
Densidade do explosivo	1,15			RL. de carga prev. Encartuchado (kg/m)		2,98	RC.Final (g/t)	279,4	
Carga de fundo			kg	Tampão médio		1,33	Volume Total desm. m3	26.814,48	
Emulsão Prevista	x	15035	kg	RC.Previsto (g/m³)		894,1	Volume desm. /furo (m³)	43,56	
Encartuchado 2 1/4"		505	kg	Perfuração Específica (m/m³)		0,18	Volume projetado topografia (m³)	26.814,48	
Acessório de coluna	679		Unid.	Carga máxima por espera (kg)		180,3	Metros tampão previsto	532,30	
Acessório de ligação	320		Unid.				Diâmetro do encartuchado(pol)	2,25	
Cordel			m	Reforçador 150 g	399	Unid.	Esquema de carregamento furo		
Mantopim	6		Unid.	Comp. Encartuchado	0,6	mt			

Tabela 3: plano de fogo. Fonte: Lopes Itabiritos.

O Poço 12, estava a uma distância de 153 metros do ponto de detonação, com CME de 180 (kg) relativamente alta para uma bancada de dez metros, registrando um valor de PPV de 14,7 mm/s conforme, (Figura 15).

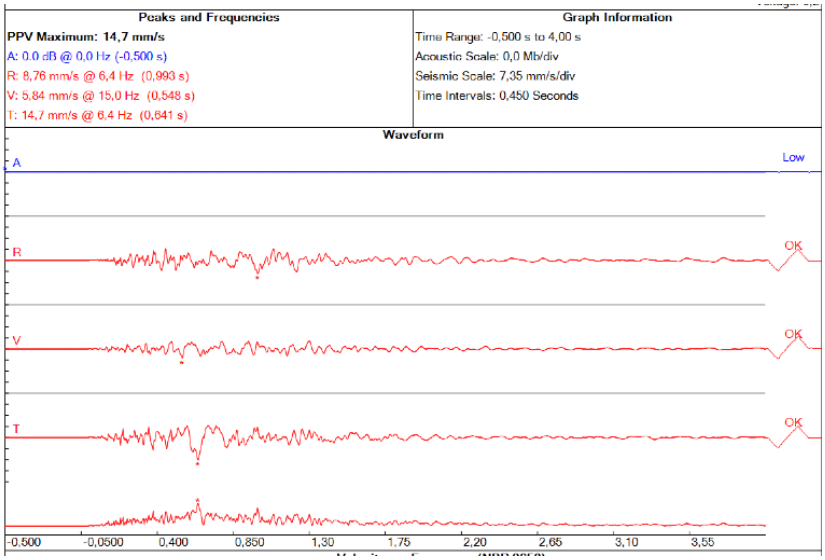


Figura 15: sismograma 1 Poço 12. Fonte: Sismógrafo White.

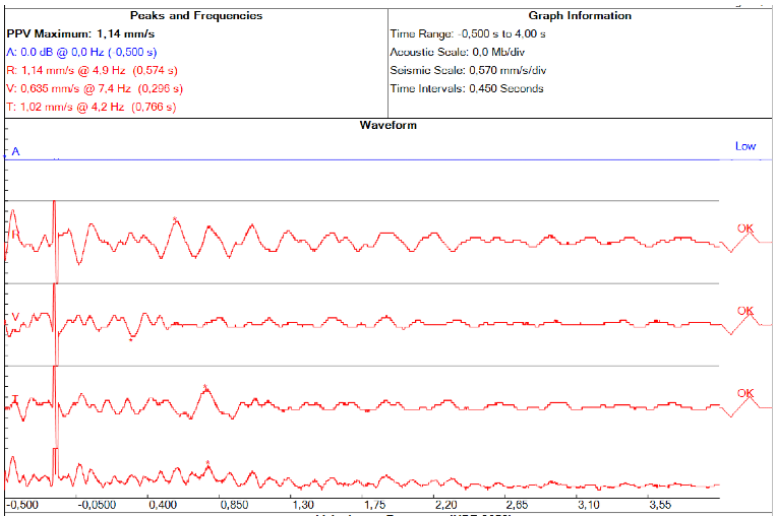


Figura 16: sismograma 2 poço 12. Fonte: Sismógrafo White.

Devido o longo tempo de vibração o sismógrafo fez dois registros sendo o primeiro no valor de 14,7 mm/s, e o segundo 1,14 totalizando 15,8 mm/s (Figura 16). Estando dentro do limite determinado na ABNT:9653. O ponto PI 040 estava a 771,6 metros da fonte geradora de vibração o desmonte, este ponto na 040 é uma estrutura de concreto chamado de viaduto onde foi monitorado (Figura 17).

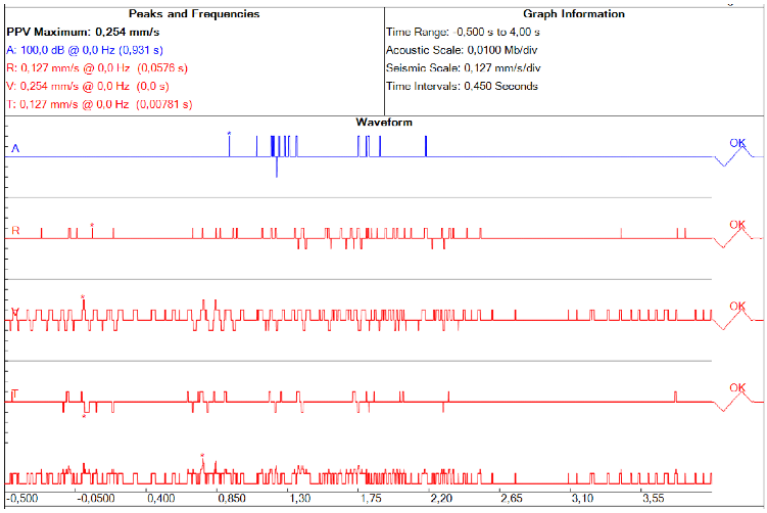
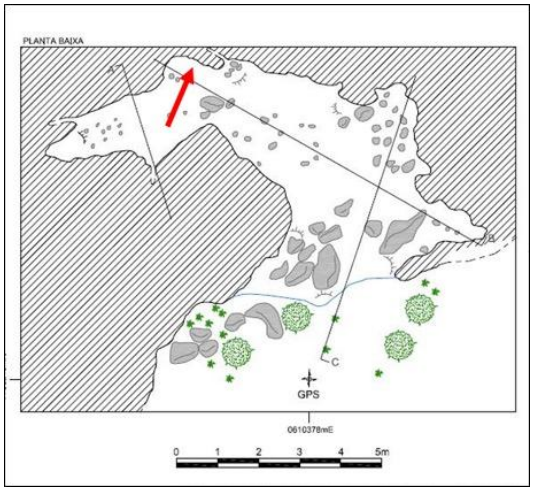


Figura 17: sismograma do ponto PI 040. Fonte: Sismógrafo White.

O ponto PI-040 o PPV de 0,254 está consideravelmente baixo sem percepção humana de vibração para a distância de 771,6 metros, sendo apenas possível a captação por sismógrafos, a estrutura a 771 metros recebeu uma leve vibração decorrente da detonação neste único dia, mas não foi o suficiente para causar danos. As cavidades VL-48 e VL-53, foi realizado um monitoramento sismográfico no período de 30 dias de monitoramento em pontos situados no interior da caverna, com o objetivo de monitorar também os níveis de vibrações sísmicas geradas pelas atividades operacionais na mineração, tráfegos de caminhões, escavações, perfuratrizes, manutenção de acessos, a localização destas cavidades estão na (Figura 11) já o mapa interno das cavidades estão nas figuras (18 e 19), a seta vermelha indica o sentido da posição do sensor.



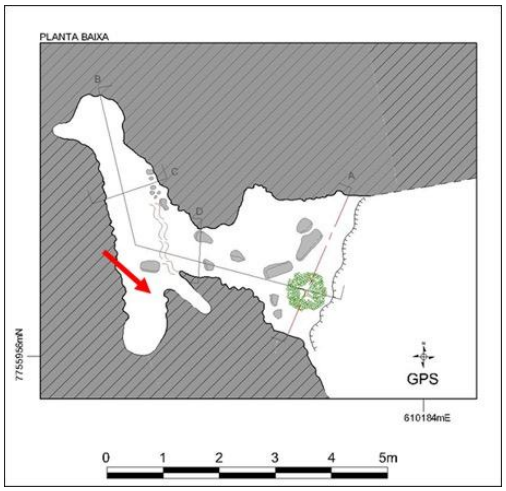


Figura 18: Cavidade VL-48 **Figura 19: Cavidade VL-53**
Fonte: Lopes Itabiritos.

No período de monitoramento a Lopes Itabiritos realizou quatro desmontes, onde sua maioria foi realizada no fundo da cava, em questões topográficas foi distante das cavidades com as seguintes distâncias: VL 48 desmonte 1: 884,4 metros (CME 218) desmonte 2: 1,283 metros (CME 389) desmonte 3: 996,08 metros (CME 191,2) desmonte 4: 895 metros (CME 218).

VL53 desmonte 1: 483,4 metros desmonte 2: 740 metros desmonte 3: 521,3 metros – desmonte 4: 479 metros, (a razão de carga é a mesma para a VL 53).

De acordo os resultados achados, a CME estava relativamente alta com distancias longas relacionadas a topografia da mina onde as cavidades estão situadas, (Figura 20). Relacionado a CME tivemos resultados relativamente baixos de PPV no qual foram registrados dois eventos em cada caverna, conforme (Tabela 4).

RESULTADOS DA SISMOGRAFIA									
Local	Sismografia	V_T (mm/s)	Freq. (Hz)	V_V (mm/s)	Freq. (Hz)	V_R (mm/s)	Freq. (Hz)	PPV (mm/s)	AR (dBL)
VL 48	Monitoramento	0,508	4,8	0,381	4,7	0,381	3,2	0,508	100

RESULTADOS DA SISMOGRAFIA									
Local	Sismografia	V_T (mm/s)	Freq. (Hz)	V_V (mm/s)	Freq. (Hz)	V_R (mm/s)	Freq. (Hz)	PPV (mm/s)	AR (dBL)
VL 48	Monitoramento	0,889	2,2	0,381	4,3	0,508	2,3	0,889	100

RESULTADOS DA SISMOGRAFIA									
Local	Sismografia	V_T (mm/s)	Freq. (Hz)	V_V (mm/s)	Freq. (Hz)	V_R (mm/s)	Freq. (Hz)	PPV (mm/s)	AR (dBL)
VL 53	Monitoramento	0,889	4,6	0,635	6,5	0,508	5,2	0,889	100

RESULTADOS DA SISMOGRAFIA									
Local	Sismografia	V_T (mm/s)	Freq. (Hz)	V_V (mm/s)	Freq. (Hz)	V_R (mm/s)	Freq. (Hz)	PPV (mm/s)	AR (dBL)
VL 53	Monitoramento	0,508	13,8	0,381	14,6	0,254	0,0	0,508	100

Tabela 4: resultado sismográfico. Fonte: Elaborado pelo Autor.

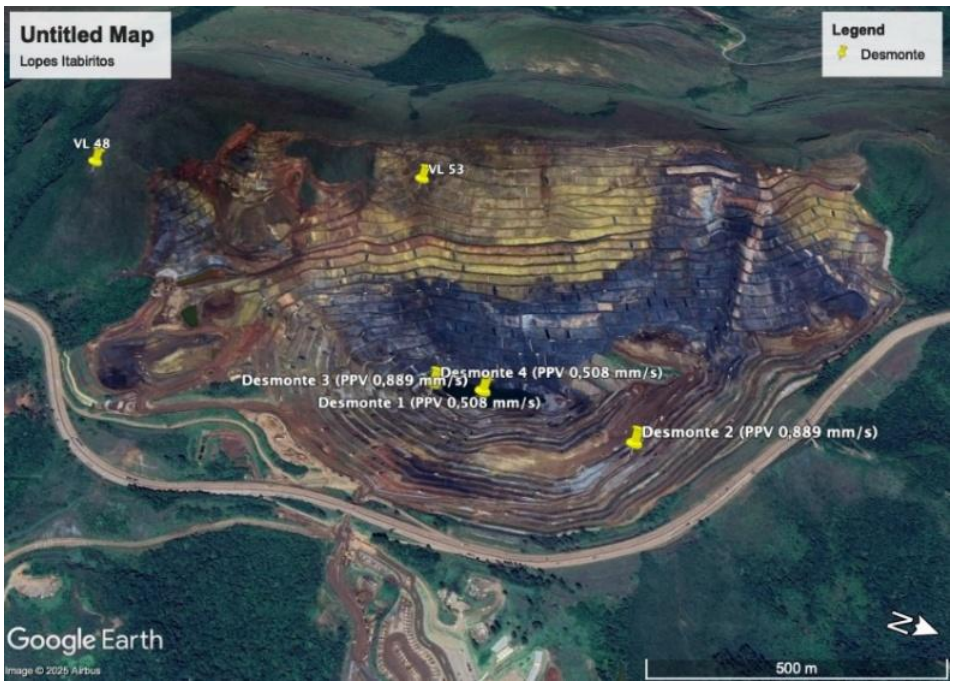


Figura 20: localização dos eventos. Fonte: Elaborado pelo Autor

Como podemos observar na tabela 4 obtivemos o registro de dois desmontes em cada uma caverna com o mesmo PPV, no entanto com frequências diferentes umas das outras provenientes de sentido de direção de iniciação do desmonte e cada um dos eixos do sensor recebeu frequências diferentes, também o local em que os sismógrafos estavam instalados dentro da cavidade, conforme (figura 21 e 22), pode gerar este tipo de resultado também.

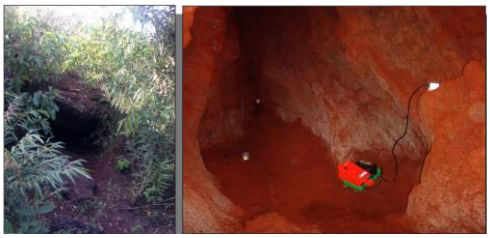


Figura 21: VL48



Figura 22: VL 53

Fonte: Elaborado pelo Autor

Como podemos observar na figura 20, a mina da Lopes Itabiritos, situada na serra da moeda, região do QF (Quadrilátero Ferrífero), não detém de litologia heterogenia, além do Itabirito friável poroso de acordo Ribeiro et al., (2021), aponta que, para rochas Friáveis provenientes da alteração de itabirito no quadrilátero ferrífero a porosidade varia de 15% a 55%.

E como mostra claramente na imagem, coberta por uma capa de canga e abaixo uma rocha anfibológica amarela, batizada na operação de “Itabirito amarelo” (Figura 23).

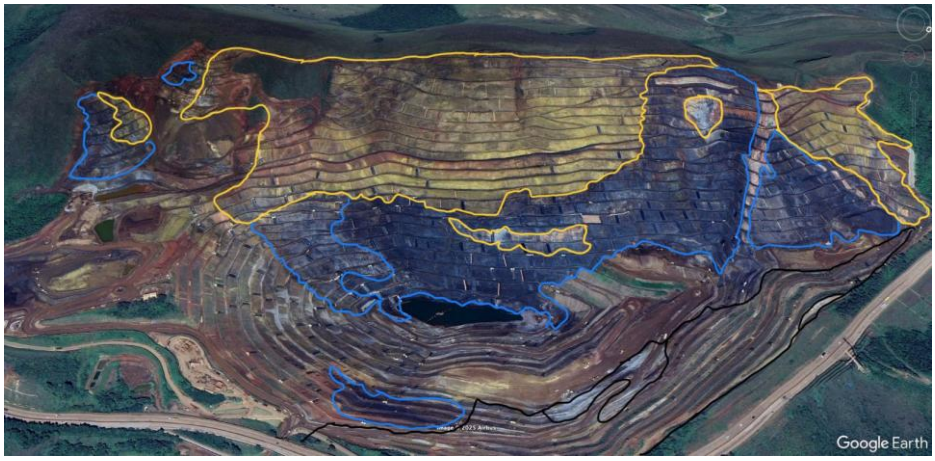


Figura 23: Delimitação de litologia. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com este estudo, podemos determinar a percolação das ondas na rocha e a importância da sismografia na geotecnia, conforme descrito na Pedreira Janaúba, composta por rocha carbonática compacta.

A litologia apresentada na Figura 23, no desmonte ocorrido na rocha com grãos grandes do tipo estéril, observou-se uma propagação mais elevada das vibrações. Se deve ao fato de que essa rocha, demarcada por linha preta, é mais compacta, consequentemente, apresenta topografia pouco acidentada. No monitoramento do desmonte mostrado na Figura 12, nota-se que os materiais com grãos grandes e textura compacta apresentam, melhor susceptibilidades sísmicas, pois as maiores áreas de contato entre as partículas resultam em maior velocidade de propagação das ondas, conforme Wang e Nur (2001).

É importante destacar que fatores como distância, CME, operações da mina, devem ser considerados, tanto na fonte geradora quanto na fonte receptora, para que o fator de segurança das estruturas não seja comprometido e não ocorra ruptura, como observado na Figura 14. Por isso, é fundamental compreender a dissipação das vibrações nas rochas e reforçar a implementação constante da sismografia na geotecnia, considerando os fatores controláveis e não controláveis que influenciam o comportamento sísmico.

Quanto à percolação das ondas em terrenos maciços, fica evidente nos sismogramas gerados é possível perceber, pela geometria das frequências de ondas a diferença entre os sismogramas de rochas diversas, conforme demonstrado nas vibrações da Figura 8, e no sismograma disponibilizado pela Pedreira Janaúba (de outro período), utilizado aqui para fins comparativos, respeitando a Lei de Uso e Compartilhamento de Dados (Lei nº 13.709/2018 – LGPD).

Mostram claramente como as ondas se comportam em rochas compactas, evidenciando a relevância do uso da sismografia como ferramenta de monitoramento geotécnico. Tal prática é pode ser determinante para a avaliação do fator de segurança das estruturas, como ilustrado nos exemplos das Figuras 24 e seguintes.

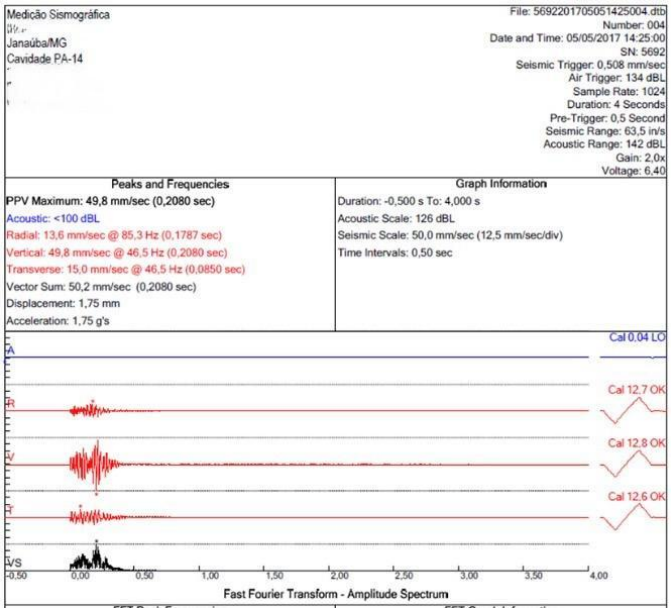


Figura 24: Sismograma de outro evento na PA 14 Pedreira Janaúba. Fonte: Sismógrafo White.

Na figura 24 a geometria das ondas nos mostra claramente o comportamento das ondas em uma fonte geradora de energia subitamente forte rápida e curta, característica de rochas compactas não fraturadas, conforme figura 9.

Para rochas de grãos grandes ou semi compactas conforme, Wang (2001) descreve. Temos geometria de onda e comportamento bem diferente, uma vibração com comprimento de ondas mais longas com mais tempo de duração do evento, vide figura 15 e 16.

Quando a fonte monitorada está sob rocha friável em meio poroso no caso do Itabirito friável no fundo da cava e o anfibolitico amarelo por cima, conforme figura 23. Temos uma geometria de ondas ainda mais interessante, as vibrações buscam caminhos entre os poros e os planos geomecânicos da rocha conforme a figura 13, vide exemplo da figura 25, mostrando a forma de onda captada pelo sismógrafo na VL-48, (Tabela 4).

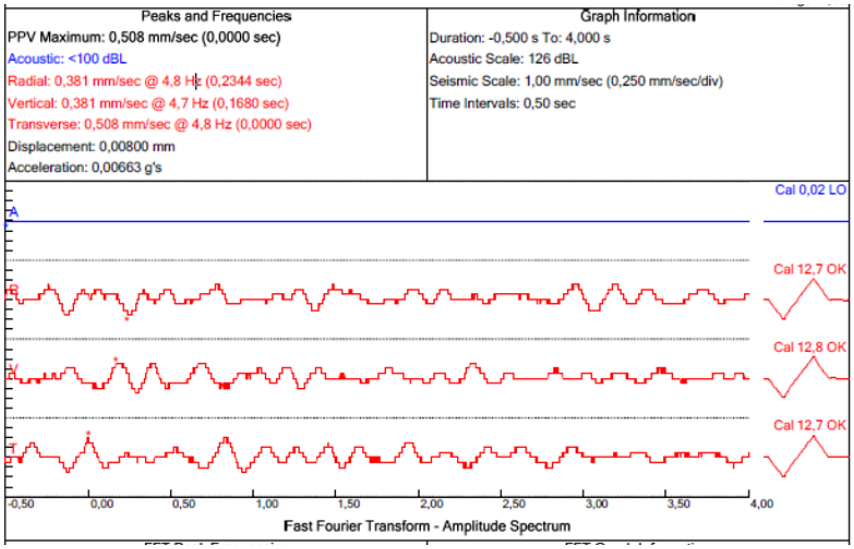


Figura 25: sismograma da VL-48. Fonte: Sismógrafo White.

Fica claro o estudo sobre a percolação das ondas em diferentes rochas fraturadas, maciças compactas e solos, pois ambas possuem parâmetros de resistências diferentes e a importância da implantação da sismografia como ferramenta de monitoramento geotécnico determinante.

Segundo Boadu,F K.; Long, L T. (1996), as fraturas em um maciço rochoso influenciam os tempos de propagação e as amplitudes das ondas sísmicas que o atravessam. Uma única fratura de diferentes propriedades geométricas e de enchimento mostra influenciar de modo dramático as propriedades de transmissão de uma onda em propagação. Em outras palavras quando há fraturas, a velocidade de propagação diminui e a atenuação aumenta (Figura 25).

Diferente dos maciços compactos e de grãos grandes, “menos fraturados”, como as ondas encontram menos descontinuidades consequentemente terá maior velocidade menor atenuação, estes foram os resultados e discussões obtidas deste estudo, próxima etapa é conclusão.

Conclusões

Este estudo mostra a relevância da sismografia para apoio à geotecnia no controle das vibrações geradas por atividades industriais. A comparação entre os dois tipos de rocha analisados o calcário compacto da Pedreira Janaúba e o itabirito friável da Mina Lopes Itabiritos demonstrou diferenças expressivas na forma de propagação das ondas sísmicas. Enquanto o calcário apresentou maior velocidade e menor atenuação, o itabirito friável exibiu comportamento mais dissipativo devido à alta porosidade e ao grau de fraturamento.

Reforçam que a litologia é determinante no fator de segurança e comportamento vibracional das estruturas e que a definição de limites únicos de PPV que existem é tecnicamente insuficiente para representar a diversidade geológica do Brasil. O estudo também demonstrou que a integração entre a sismografia e os demais instrumentos geotécnicos (radares, piezômetros, inclinômetros) pode aprimorar significativamente a avaliação de estabilidade, permitindo o controle em tempo real do “stress” vibracional a que as estruturas estão submetidas. Conclui-se que a criação de uma norma nacional específica sobre vibrações em diferentes tipos de rocha é indispensável para a segurança das pessoas e das estruturas.

Referências Bibliográficas

ABNT. NBR 9653:2020 — **Vibrações – Controle de vibrações oriundas de detonações**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020.

ADAM, L. **Seismic Wave Attenuation in Carbonates**. Boise: Boise State University, 2009.

AGÊNCIA DO GOVERNO NORTE-AMERICANO – UNITED STATES BUREAU OF MINES (USBM). **Structure Response and Damage Produced by Ground Vibrations from Surface Mine Blasting (RI 8507).** Washington, D.C.: U.S. Department of the Interior, 1980.

BOADU, F. K.; LONG, L. T. **Effect of Fractures on Seismic Wave Velocity and Attenuation.** Geophysical Journal International, v. 127, n. 1, p. 86–110, 1996.

BOLT, B. A. **Earthquakes**. 4. ed. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1988.

BRANDI, J. A. C. et al. **Estudo da Propagação de Vibrações em Maciços Carbonáticos**. Revista Brasileira de Geotecnia, v. 3, n. 2, p. 45–58, 2015.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto Bambuí: Relatório Geológico e Hidrogeológico**. Belo Horizonte: CPRM, 2010.

DIN. DIN 4150-3 – **Structural Vibration: Effects of Vibration on Structures**. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 1999.

DOWDING, C. H. **Construction Vibrations**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1996.

DUTRA, L. M. **Proteção do Patrimônio Espeleológico e as Normas de Segurança em Mineração**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

INTERNATIONAL SOCIETY OF EXPLOSIVES ENGINEERS (ISEE). **Field Practice Guidelines for Blasting Seismographs**. Cleveland: ISEE, 2015.

LEI Nº 13.709, DE 14 DE AGOSTO DE 2018**. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD).** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 15 ago. 2018.

NAVARRO TORRES, L. et al. **Assessing and Controlling of Bench Blasting-Induced Vibrations to Minimize Impacts to a Neighboring Community**. Journal of Sustainable Mining, v. 17, n. 4, p. 200–210, 2018.

RIBEIRO, L. C. et al. **From Fresh Itabirites and Carbonates to Weathered Iron Ore: Mineral Composition, Density and Porosity of Different Fresh and Altered Rocks from the Quadrilátero Ferrífero**, Brazil. Minerals, v. 11, n. 1, p. 29, 2021.

SENOSSIAN, M. **Dicionário de Termos Geológicos e Minerários**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

UNITED STATES BUREAU OF MINES (USBM). **Structure Response and Damage Produced by Ground Vibrations from Surface Mine Blasting (RI 8507).** Washington, D.C.: U.S. Department of the Interior, 1980.

WANG, Z.; NUR, A. **Seismic Wave Propagation and Rock–Fluid Properties**. Amsterdam: Elsevier, 2001.

WANG, Z.; NUR, A. **Seismic Wave Propagation and Rock–Fluid Properties**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2015.

WHITE INDUSTRIAL SEISMOLOGY, INC. **Manual Técnico do Sismógrafo Mini-Seis**. Michigan: White Industrial Seismology, 2015.

MAPEAMENTO E ANÁLISE DA VEGETAÇÃO ARBÓREA URBANA DO BIOMA PAMPAS ATRAVÉS DE IMAGENS ORBITAIS MULTIESPECTRAIS

1 Lediane aparecida Nery Maciel, 2 Ana Paula Marques Ramos.
1 Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", e-mail: lediane.nery@unesp.br;
2 Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", e-mail: marques.ramos@unesp.br.

Palavras-chave: Vegetação arbórea urbana; Sensoriamento remoto; Random Forest.

Resumo

A arborização urbana desempenha um papel fundamental nas dinâmicas socioambientais, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar, a promoção da biodiversidade e a regulação das temperaturas em áreas urbanas. Para que essas funções sejam integradas ao planejamento urbano, é essencial realizar um mapeamento das áreas ocupadas pela vegetação arbórea. Imagens de sensoriamento remoto são uma fonte de dados essencial para atender a essa demanda, pois permitem uma visão sinótica e temporal da área de interesse, especialmente em regiões de difícil acesso. Essas imagens podem ser classificadas por métodos manuais - menos usual, ou por algoritmos, como aqueles baseados em aprendizagem de máquina. Todavia, a eficácia desses algoritmos depende da qualidade dos dados de treinamento/validação/teste. Assim, a comparação dos resultados gerados por método manual e por processos automatizados torna-se essencial para validar a capacidade de modelos baseados em inteligência artificial. Este trabalho apresenta um estudo de caso visando preencher essa lacuna. Fez-se o mapeamento da vegetação arbórea urbana por vetorização manual e por aprendizagem supervisionada de máquina em imagens orbitais multiespectrais de média resolução espacial. As imagens pertencem à constelação PlanetScope (~3m) e recobrem duas áreas de estudo, uma no município de Canoas e outra em Viamão, ambas no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O algoritmo utilizado foi o Random Forest e produziu resultados compatíveis à vetorização manual na ordem de até aproximadamente 80%, em termos da métrica F1-score para a classe de interesse (árvore). Os dados gerados possibilitaram a análise temporal da cobertura arbórea, considerando imagens de períodos anteriores e posteriores à ocorrência de eventos de inundação nas áreas em estudo. Maiores implicações são discutidas no texto quanto às potencialidades e limitações do modelo de aprendizagem de máquina em comparação ao método manual sob contextos espaciais e temporais.

Introdução

As florestas urbanas vêm sendo manejadas e moldadas de acordo com as diferentes relações estabelecidas entre a sociedade e o meio ambiente, refletindo demandas sociais, ambientais, econômicas e culturais. Esses espaços evidenciam a interação entre população e ambiente, desempenhando papel relevante na preservação ambiental e no fortalecimento da identidade local (Konijnendijk, 2008). Ao longo do tempo, as florestas e árvores urbanas passam por transformações tanto decorrentes de processos naturais quanto de ações antrópicas, influenciadas por contextos socioeconômicos, culturais e por legislações voltadas à exploração, proteção, preservação ou recuperação da vegetação (Pippi; Trindade, 2013).

Nesse contexto, destaca-se a arborização urbana, definida por Biondi (2008) como toda a vegetação que, independentemente do porte, compõe o cenário urbano. Trata-se de um importante componente biótico da cidade, pois contribui para o conforto ambiental e oferece diversos benefícios à população e ao meio ambiente, como a regulação térmica, o conforto lumínico, a conservação da flora nativa e o abrigo para a fauna urbana (Cemig, 2011; Meijueiro, 2022).

Considerando que o presente estudo está inserido no bioma Pampa, torna-se fundamental caracterizá-lo para compreender as transformações da vegetação urbana analisadas. Restrito ao estado do Rio Grande do Sul, o Pampa ocupa aproximadamente 193.836 km², correspondendo a cerca de 2,3% do território brasileiro e 69% do território estadual. Suas paisagens incluem campos nativos, matas ciliares, formações arbustivas, butiazais e afloramentos rochosos. No entanto, a expansão de monoculturas e a introdução de espécies exóticas têm provocado a degradação e a descaracterização dessas paisagens, comprometendo o desenvolvimento sustentável da região (IBGE, 2019).

Além das pressões associadas ao uso e cobertura do solo, o Rio Grande do Sul tem enfrentado o agravamento de eventos climáticos extremos, como inundações de grande magnitude, que atingiram a maioria dos municípios do estado, resultando em perdas humanas, danos materiais e deslocamento de milhares de pessoas (Rizzotto; Costa; Lobato, 2024). Esses eventos evidenciam a necessidade de monitoramento contínuo da dinâmica ambiental, especialmente da vegetação urbana, que desempenha papel relevante na mitigação de impactos ambientais.

Diante desse cenário, o sensoriamento remoto torna-se essencial. Dados orbitais permitem análises em diferentes escalas espaciais, temporais e espectrais, possibilitando o monitoramento de grandes áreas e a identificação de mudanças ambientais ao longo do tempo (Sausen, 2016). Esses dados podem ser integrados a demais dados espaciais, contribuindo para análises mais eficientes e precisas do ambiente (Santos et al., 2015; Pires et al., 2012; Souza; Rebelato, 2021). Todavia, uma difícil decisão é sobre o método a ser aplicado para a extração de informações nas imagens de sensoriamento remoto. A classificação de imagens pode ocorrer por métodos puramente manuais, como a vetorização, ou semiautomáticos (Jensen, 2009). Nesse último, destaca-se o uso de algoritmos de aprendizagem de máquina, como o Random Forest, mas que são fortemente dependentes da qualidade dos

dados empregados na fase de treinamento e teste do algoritmo. Esses algoritmos utilizas atributos derivados das bandas espectrais das imagens para distinguir diferentes classes e, uma vez adequadamente treinados e validados, permitem a geração de mapas temáticos com elevado grau de acurácia, apoiando análises ambientais e temporais (Paiva et al., 2020).

Com base nesse contexto, o presente estudo realizou a vetorização manual da vegetação arbórea e a aplicação do algoritmo Random Forest para a classificação automática em imagens orbitais multiespectrais PlanetScope, abrangendo os municípios de Canoas e Viamão, no estado do Rio Grande do Sul. A partir dessas abordagens, procedeu-se à comparação entre métodos manuais e automatizados, bem como à análise das mudanças temporais na cobertura arbórea, incluindo períodos anteriores e posteriores a eventos de inundações. Os resultados obtidos subsidiaram a construção de um banco de dados geográficos sobre a vegetação urbana desses municípios e permitiram avaliar o desempenho do algoritmo em diferentes contextos espaciais e temporais.

Metodologia

Áreas de estudo

Foram definidos como áreas de estudo os municípios de Canoas e Viamão, situados no bioma Pampa, no estado do Rio Grande do Sul, por apresentarem contrastes na densidade arbórea urbana, sendo Canoas caracterizado por baixa densidade e Viamão por alta densidade de vegetação arbórea. O município de Canoas (Figura 1) apresenta uma área territorial de 130.774 km², com uma população estimada de 347.657 pessoas. Canoas está inserido no bioma Pampa (IBGE, 2018), cuja vegetação natural é caracterizada principalmente por campos nativos e manchas florestais (Rambo, 1956). O clima da região é do tipo subtropical úmido, com verões quentes, invernos amenos (Peel et al., 2027) e uma média anual de precipitação de aproximadamente 1.580 mm (Climate Data).

Segundo Viegas, Relly e Graebin (2021), Canoas, banhada pelos rios dos Sinos e Jacuí, possuía vários arroios com presença de ilhas de vegetação (mata circular) dispersas em áreas de campo com espécies nativas e uma grande quantidade de vegetação nas margens dos rios (Schutz; Graebin, 2024). O processo de formação do município, marcado pela fragmentação territorial resultante da implantação de loteamentos populares e distritos industriais, ocasionou uma grande redução das áreas verdes e a canalização de diversos arroios. Também houve a expansão de vilas clandestinas e ocupações irregulares, impulsionadas por intensos fluxos migratórios, bem como a ocupação de conjuntos habitacionais de forma desordenada (Schutz; Graebin, 2024).

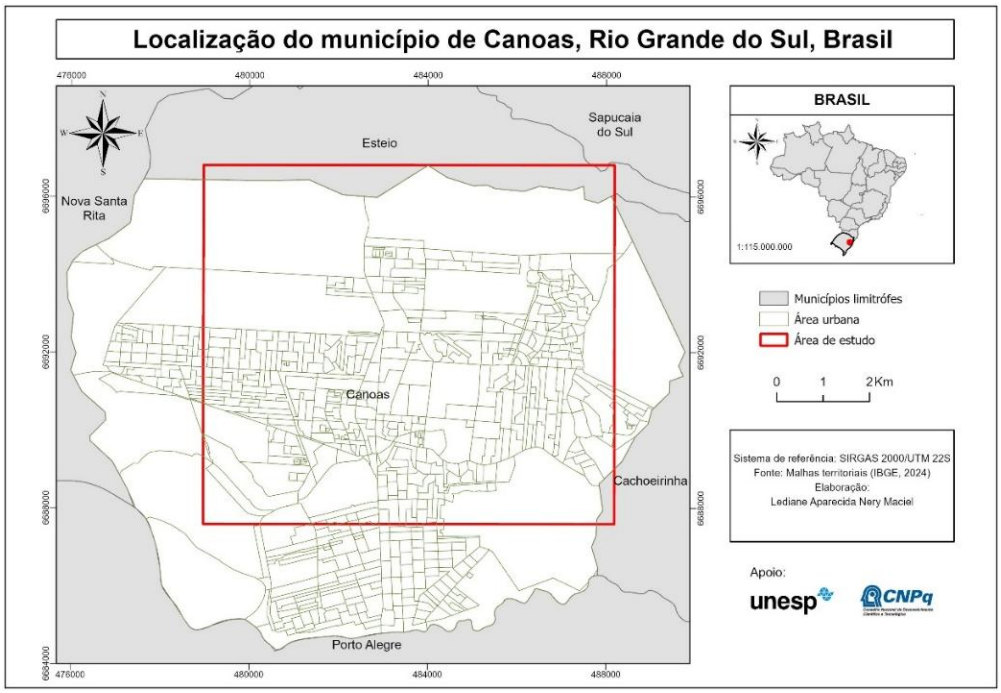


Figura 01: Localização do município de Canoas. Fonte: Autoras (2025).

O município de Viamão (Figura 2) é o maior em extensão territorial na Região Metropolitana de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul. Com uma população estimada em 224.122 habitantes e área de 1.496,019 km², Viamão está inserido no bioma Pampa (IBGE, 2018) e possui média anual de precipitação de aproximadamente 1.590 mm (Climate Data). Esse município é frequentemente caracterizado como uma cidade dormitório, abrigando uma população significativa que trabalha em Porto Alegre. Devido à sua grande extensão, o município é subdividido em oito distritos: Viamão, Águas Claras, Capão da Porteira, Espigão, Itapuã, Passo da Areia, Passo do Sabão e Viamópolis (Viamão, 2024). A área municipal está inserida em três bacias hidrográficas principais: Lago Guaíba (9%), Gravataí (39%) e Litoral Médio (52%) (Rio Grande do Sul, 2020). Estima-se que aproximadamente 40% do território de Viamão seja destinado à preservação ambiental, destacando-se unidades de conservação como o Parque Estadual de Itapuã (5.566 ha), o Parque Saint-Hilaire (908 ha) e o Refúgio de Vida Silvestre Banhado dos Pachecos (2.500 ha) (Bones; Barrionuevo, 2023).

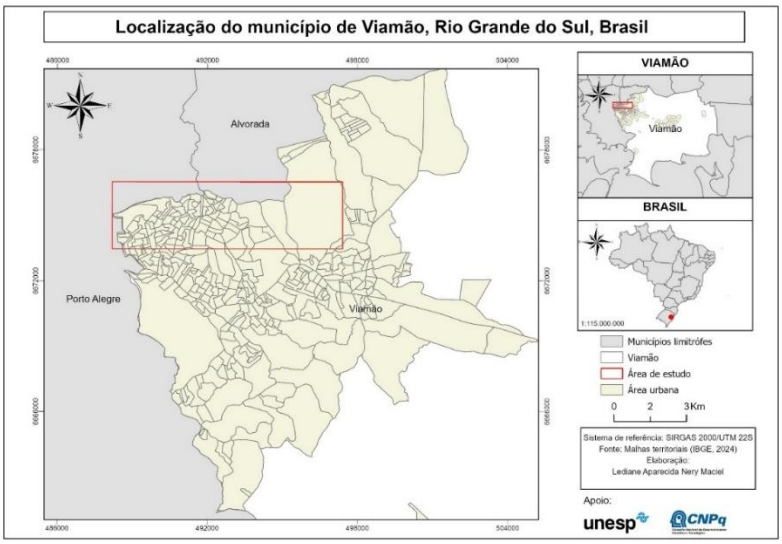


Figura 02: Localização do município de Viamão. Fonte: Autoras (2025).

Materiais e métodos

Inicialmente, realizou-se a delimitação das áreas urbanas dos municípios em estudo a partir dos limites definidos pelos setores censitários de 2021 do IBGE. Posteriormente, foi preparado, para ambas as áreas de estudo, um banco de dados geográficos, contendo além da base cartográfica de setor censitário e limite de municípios, as imagens orbitais multiespectrais de diferentes datas. Neste trabalho, utilizaram-se as cenas PlanetScope, da constelação de nanossatélites Dove, que possuem resolução espacial aproximada de 3 metros, resolução temporal diária e resolução radiométrica de 12 bits. As áreas de vegetação arbórea foram então vetorizadas manualmente por meio de ferramentas de geoprocessamento e interpretação visual das cenas orbitais, compondo o dataset de maior fidelidade à realidade, ou seja, o dado de referência. Esta etapa é fundamental para a geração de dados de alta qualidade utilizados no treinamento, validação e teste do algoritmo de classificação supervisionada das images. Para apoiar o processo de vetorização, as imagens foram utilizadas nas composições em cor natural (RGB 432) e falsa cor (RGB 864).

A classificação semiautomática da vegetação arbórea foi realizada com o algoritmo de aprendizagem de máquina Random Forest, com o objetivo de avaliar a viabilidade de substituição da vetorização manual por métodos automatizados. Parte dos dados vetorizados foi destinada ao treinamento e validação do modelo e outra parte ao teste de desempenho. O modelo Random Forest foi configurado com os seguintes parâmetros: número máximo de árvores igual a 100, profundidade máxima de 30, número máximo de amostras por classe de 100 e 100 pontos aleatórios. A classificação das imagens ocorreu utilizando as cenas em composição falsa cor (RGB 864), pois é aquela que melhor segregou o alvo de interesse (árvores) dos demais elementos naturais e antrópicos.

O desempenho do modelo foi avaliado por meio das métricas Precision, Recall e F1-Score, sendo esta última a média harmônica entre a Precisão e a Revocação, permitindo uma avaliação equilibrada do desempenho do classificador. É importante salientar que o algoritmo Random Forest foi treinado e testado considerando diferentes domínios. Foram considerados diferentes cenários experimentais, combinando variações espaciais e temporais. O modelo foi avaliado tanto em situações em que treinamento e teste ocorreram na mesma área e no mesmo ano, quanto em cenários com mudança de área, de ano, ou de ambos. O intuito foi analisar a capacidade de generalização do modelo e sua aplicabilidade como alternativa à vetorização manual. Por fim, foi realizada a análise das mudanças temporais na cobertura da vegetação arbórea, quantificando as áreas vegetadas nos municípios em diferentes datas. Os resultados foram apresentados por meio de mapas temáticos, possibilitando a análise das dinâmicas espaciais e temporais da vegetação arbórea urbana no bioma Pampa.

Resultados e discussão

Os resultados foram organizados de acordo com protocolo experimental empregado, o qual variou em função da área de estudo considerada e o ano das imagens PlanetScope utilizadas. Primeiramente, definiu-se um total de 04 modelos de classificação supervisionada para o contexto de cidade com alta densidade arbórea. Os experimentos foram os que seguem: :

✓ Experimento 1: O treino e teste do algoritmo foi realizado em dados da cidade de Viamão, ano de 2024, representando a data após as inundações;

✓ Experimento 2: O treino e teste foi realizado em Viamão, em 2024 (data após as inundações), e o modelo aplicado em Viamão, ano de 2023, antes das inundações ocorrerem.

✓ Experimento 3: O treino e teste foi realizado em Viamão em 2024 (após as inundações) e o modelo aplicado na cidade de Canoas, ano 2023 – período antes das inundações.

✓ Experimento 4: O treino e teste foi realizado em Viamão em 2024, após as inundações, e o modelo aplicado em Canoas em 2024 após as inundações.

Para cada um desses experimentos, foram utilizadas a proporção de 70% para dado de treino e 30% para dados de teste. Lembrando que os dados de teste não são vistos pelo algoritmo na fase de treinamento para garantir que o modelo gerado aprenda efetivamente a tarefa proposta. O desempenho do modelo foi avaliado por métricas quantitativas (F1 Score, Precision e Recall).

Também, análises qualitativas foram conduzidas considerando o resultado da classificação gerada pelo modelo, a imagem original e a vetorização manual. A Figura 3 mostra as métricas obtidas em cada um dos experimentos (1, 2, 3 e 4).

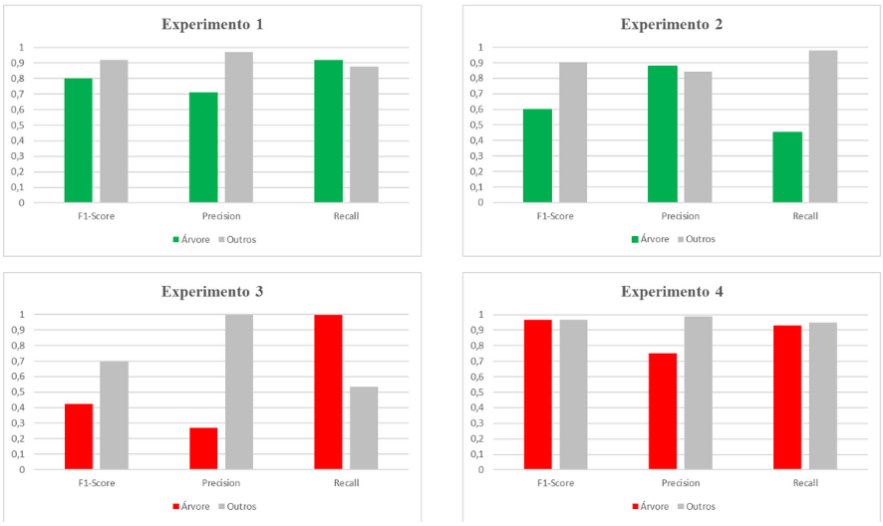


Figura 03: Métricas de desempenho do modelo (nos dados de teste) em cada um dos quatro experimentos realizados em função de diferentes datas e áreas geográficas. Fonte: Autoras (2025).

Posteriormente, conduziram-se os experimentos (5, 6, 7 e 8) de classificação supervisionada das imagens PlanetScope com o algoritmo Random Forest para o contexto de cidade com baixa densidade arbórea, da seguinte maneira:

✓ Experimento 5: O treino e teste do algoritmo foi realizado em dados da cidade de Canoas, ano de 2024, representando a data após as inundações;

✓ Experimento 6: O treino e teste foi realizado em imagens de Canoas de 2024 (após as inundações) e o modelo aplicado em Canoas, ano de 2023, representando o período anterior às inundações;

✓ Experimento 7: O treino e teste foi realizado em Canoas, ano de 2024 e após as inundações, e o modelo aplicado em Viamão ano de 2023, em data anterior à ocorrência das inundações;

✓ Experimento 8: O treino e teste foi realizado em Canoas, ano de 2024 (após as inundações) e o modelo aplicado em Viamão, ano de 2024 - após as inundações.

Também para cada experimento foi considerada a proporção de 70% para dado de treino e 30% para dados de teste e extraídas métricas quantitativas e desenvolvidas análises qualitativas dos resultados. Na Figura 4 apresentam-se os resultados quantitativos.

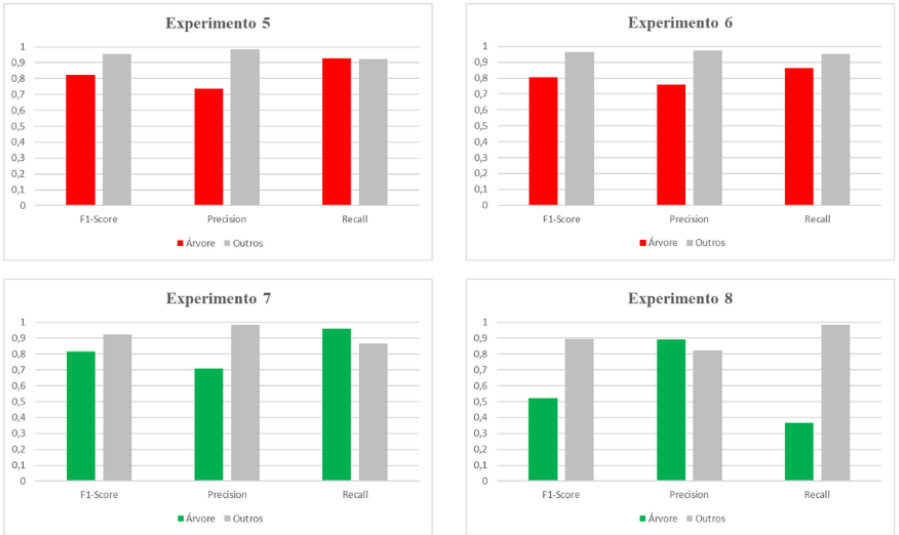


Figura 04: Métricas de desempenho do modelo (nos dados de teste) em cada um dos quatro experimentos realizados em função de diferentes datas e áreas geográficas. Fonte: Autoras (2025).

As análises qualitativas sobre os resultados gerados pelo modelo Random Forest no conjunto de experimentos estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2. Essa avaliação visual possibilita verificar o comportamento do classificador em cenários de alta (Tabela 1) e baixa densidade arbórea (Tabela 2), demostrando sua capacidade e limitação de generalização no que se refere à detecção da vegetação arbórea em contextos espaciais e temporais distintos.

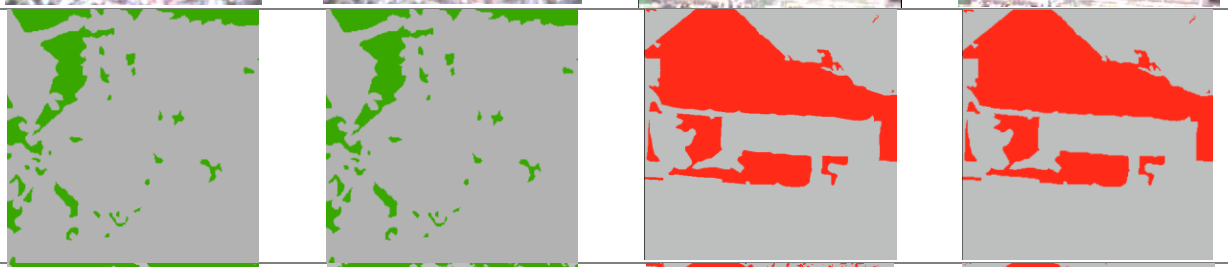
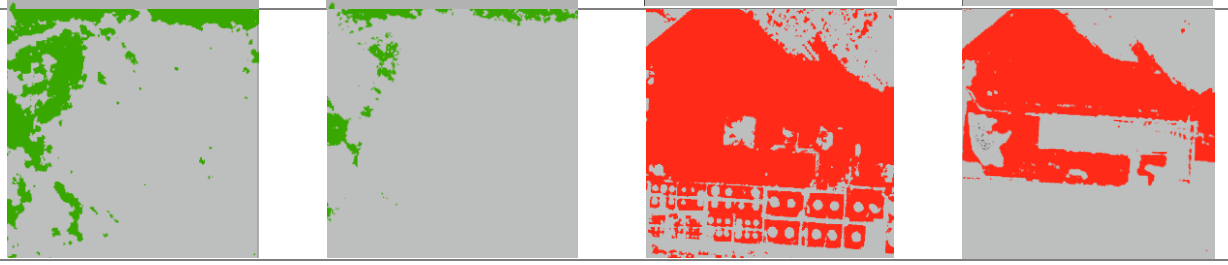
	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4
Imagem (RGB432)				
Ground Truth				
Predição				

Tabela 01: Avaliação visual dos resultados do modelo treinado com dados de Viamão (2024), aplicada a recortes espaciais dos municípios de Canoas e Viamão. A vegetação foi representada em cores distintas, vermelho para Canoas e verde para Viamão, com o objetivo de facilitar a interpretação e a comparação do comportamento do modelo em diferentes contextos territoriais. Fonte: Autoras (2025).

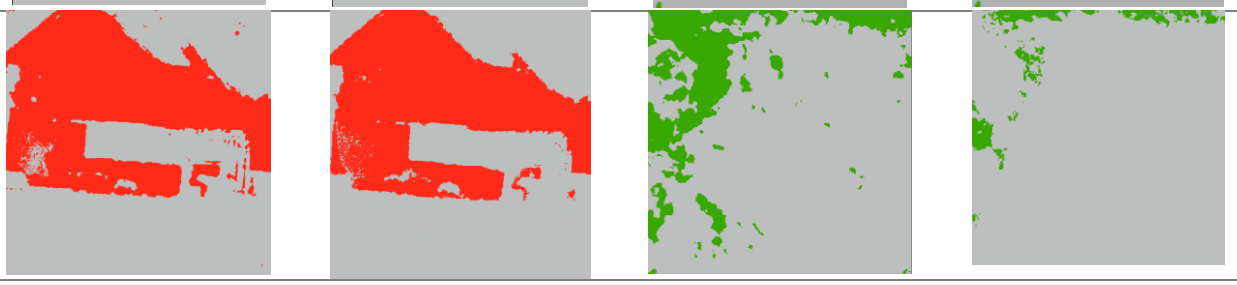
	Experimento 5	Experimento 6	Experimento 7	Experimento 8
Imagem (RGB-432)				
Ground Truth				
Predição				

Tabela 02: Análise visual dos resultados do modelo treinado com dados do município de Canoas (2024), aplicada a recortes espaciais dos municípios analisados, permitindo a comparação qualitativa do desempenho do modelo entre diferentes áreas geográficas. Fonte: Autoras (2025).

Quando treinado e testado em dados da mesma área e data (experimento 1), o modelo apresentou bom desempenho para ambas as classes ('Árvore' x 'outras'), refletido pela métrica de F1-score, assim como alto valor de Recall (acima de 80%), sobretudo, para a classe 'Árvore', mas nota-se uma queda no valor da métrica de Precisão para esta mesma classe (Figura 3). Isso sugere que, treinado e testado no mesmo local e período, o Random Forest captou bem as características da vegetação arbórea, mas ainda apresentou alguns falsos positivos. No experimento 2, houve queda no F1-score da classe Árvore, especialmente pelo baixo Recall, apesar da boa Precisão. Isso indica que o modelo não conseguiu reconhecer muitas árvores em 2023, refletindo mudanças significativas no padrão espectral da vegetação entre antes e depois das inundações. A classe 'Outros' manteve bom desempenho, sugerindo maior estabilidade dessa categoria frente às mudanças ambientais. No experimento 3, o desempenho do classificador na classe Árvore foi o pior entre todos os experimentos realizados (Figura 3), com Recall muito alto, mas Precisão extremamente baixa. Isso mostra que o modelo classificou quase todas as árvores corretamente, mas também confundiu muitos pixels da classe 'Outros' como Árvore (Tabela 1), gerando falsos positivos. Essa dificuldade decorre tanto da diferença temporal (antes e pós-inundações) quanto da espacial (Viamão e Canoas), que aumentou a variabilidade espectral. O experimento 4 (Tabela 2) revela que o Random Forest mostrou desempenho equilibrado e elevado em ambas as classes, com métricas próximas de 0,9. Isso sugere que, apesar da diferença espacial, a proximidade temporal (ambos após inundações) contribuiu para maior semelhança espectral e melhor transferência do modelo entre municípios.

No contexto de baixa densidade arbórea, no experimento 5 (Figura 4), assim como no experimento 1, o modelo obteve bom desempenho, com Recall alto para a classe 'Árvore'. Isso reforça que, quando o modelo é aplicado no mesmo espaço e tempo de treino, consegue capturar melhor as características da vegetação, mesmo em cenários de pós-enchente. Ademais, no experimento 6 os resultados foram estáveis, mas houve queda das métricas em relação ao constatado no experimento 5. Ainda que a classe Árvore apresentou Recall satisfatório, a Precisão caiu. Isso confirma que as mudanças ambientais entre 2023 e 2024 impactaram o reconhecimento da vegetação, embora de forma menos rigorosa do que em Viamão. No experimento 7 o modelo alcançou excelente Recall para Árvore, mas com Precisão um pouco mais baixa. Isso significa que ele conseguiu detectar quase todas as árvores em Viamão antes das inundações, embora com certa confusão com a classe 'Outros'. O desempenho foi bom, considerando a transferência entre cidades e períodos distintos, sugerindo maior compatibilidade espectral nesse caso específico. Por fim, no experimento 8, observou-se um dos piores cenários para a classe Árvore, com Recall muito baixo, embora a Precisão tenha sido alta. O modelo identificou poucas árvores, mas de forma correta quando o fez, essa dificuldade pode estar relacionada a diferenças na resposta espectral da vegetação entre Canoas e Viamão no período pós enchente, o que limitou a transferência de aprendizagem do modelo.

Diante disso, os achados desse trabalho apontam que o modelo que obteve melhor desempenho quando treinado e testado no mesmo local e período temporal (experimentos 1 e 5), capturando as características da vegetação de cada uma das áreas. Quando houve transferência temporal, ou seja, modelos treinados em 2024 e aplicados em 2023, observou-se perda no desempenho, sobretudo no Recall, que representa a classe de interesse, a classe 'Árvore' (experimentos 2 e 6). Isso aponta a limitação do modelo em generalizar, sobretudo, sob interferência de fenômenos como as inundações que podem ter provocado mudanças nos padrões espectrais dos alvos, dificultando a detecção de árvores.

Para os casos de transferência espacial entre municípios, os resultados foram um pouco mais variados. Quando a aplicação ocorreu em períodos semelhantes, ambos após inundações (experimento 4), o modelo obteve um bom desempenho, mostrando que a proximidade entre datas favoreceu a generalização. Já em períodos diferentes (experimentos 3 e 8), o desempenho foi insatisfatório. No experimento 3, por exemplo, houve excesso de falsos positivos para a classe Árvore, o que se deve provavelmente à semelhança espectral entre áreas de vegetação arbórea e outras coberturas, como pastagens e vegetação rasteira, que podem ter sido alteradas pelas inundações, gerando confusão para o modelo (Tabela 2). Já no experimento 8, ocorreu o oposto, o modelo apresentou muitos falsos negativos, classificando poucas árvores, ainda que com alta precisão. Assim, destacam-se os experimentos 4 e 7 como os mais positivos, pela capacidade de generalização espacial e temporal, enquanto os experimentos 3 e 8 representaram os piores cenários, justamente pelo desequilíbrio entre falsos positivos e falsos negativos.

Considerações finais

O estudo demonstrou o potencial de integração entre técnicas de inteligência artificial e dados de sensoriamento remoto para mapeamento da vegetação arbórea urbana. Comparado aos resultados da vetorização manual, comprova-se alta capacidade do Random Forest na tarefa, mas sendo este treinado e testado em dados da mesma cidade e data. O modelo enfrenta dificuldades de generalização quando há variação de datas das imagens ou mesmo mudança de cidade. Para superar esse desafio, recomenda-se experimentos com redes neurais profundas. A vetorização manual, embora onerosa, permite o mapeamento do alvo de interesse com alto rigor geométrico, e esses dados fundamentais para averiguar a acurácia dos modelos de aprendizagem de máquina. Os dados gerados nesse trabalho auxiliam em medidas de planejamento sustentável e gestão ambiental de cidades, pois possibilitam a produção de produtos cartográficos temáticos que oferecem suporte às ações de políticas públicas sustentáveis.

Agradecimentos

Agradecemos à Pró-Reitoria de Pesquisa - Coordenação de Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Unesp pela concessão da bolsa de Iniciação Científica à primeira autora desse trabalho, por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica da Unesp 2024/2025 - PIBIC, via Edital PROPe 8/2024. Agradecemos também ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro mediante os processos 305814/2023-0 e 403213/2023-1.

Referências

CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais). **Manual de arborização**. Belo Horizonte: Cemig/Fundação Biodiersitas, 2011.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Biomas e sistema costeiro marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000**. Rio de Janeiro: Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2019.

JENSEN, John R. Sensoramiento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em Recursos Terrestres. 2009.

KONIJNENDIJK, Cecil C. **The forest and the city: the cultural landscape of urban woodland.** Denmark: Springer Science and Business Media B.V., 2008.

MEIJUEIRO, Matheus D'Angelo Medici. **Avaliação da cobertura arbórea urbana de São Gabriel/RS**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Pampa, Campus São Gabriel, São Gabriel, 2023.

PAIVA, Roberto; OLIVEIRA, Sávio; MARTINS, Wellington; PARENTE, Leandro. **Análise de metacaracterísticas para classificação de uso e cobertura do solo utilizando Random Forest**. In: WORKSHOP DE COMPUTAÇÃO APLICADA À GESTÃO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS (WCAMA), 11., 2020, Evento Online. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2020. p. 71-80.

RIZZOTTO, Maria Lucia Frizon; COSTA, Ana Maria; LOBATO, Lenaura de Vasconcelos da Costa. **Crise climática e os novos desafios para os sistemas de saúde: o caso das inundações no Rio Grande do Sul/Brasil**. Saúde em Debate, Rio de Janeiro, v. 48, n. 141, p. 5–12, abr./jun. 2024. DOI: <10.1590/2358-28982024141EDP>.

SCHUTZ, Jairo Alberto Vieira; GRAEBIN, Cleusa Maria Gomes. **Canoas (RS) e a construção do patrimônio cultural: elementos históricos, desafios socioespaciais e ambientais**. Revista Memória em Rede, Canoas, v. 16, n. 30, p. 1–18, jan. 2024.

SANTOS, N. R. Z.; TEIXEIRA, I. F. **Arborização de vias públicas: ambiente x vegetação**. Santa Cruz do Sul: Instituto Souza Cruz, 2001. v. 135.

SOUZA, E. G. S.; REBELATO, M. G. **Avaliação da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Baixo Mogi com uso da geotecnologia**. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, Curitiba, v. 4, n. 1, p. 411-426, jan./mar. 2021.

MONITORAMENTO AMBIENTAL INTELIGENTE DO NÍVEL DE ÁGUAEM ÁREAS URBANAS PARA DRENAGEM SUSTENTÁVEL E RESILIÊNCIA A ALAGAMENTOS

1 Caio Martins da Silva, Thiago Quintal da Silva, 1 Beatriz Quintão dos Santos Rodrigues, 2 Weber Silva Gaia Filho, 2 Taiane Alvarenga Menandro Garcia de Freitas, 2 Alexander Cascardo Carneiro, 2 Andrés Pablo López Barbero

1 Departamento de Engenharia de Telecomunicações, grad – UFF, Niterói, Brasil; 2 Prog. de Pós-Graduação em Instrumentação e Óptica Aplicada – UFF, Niterói, Brasil

Palavras-chave: Monitoramento ambiental; Drenagem urbana; Internet das Coisas

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de baixo custo para monitoramento ambiental do nível de água em áreas urbanas, com aplicação em drenagem urbana, alerta de alagamentos e suporte à gestão hídrica. A proposta se insere, prioritariamente, nas áreas de Geotecnologias e Monitoramento Ambiental, Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis e Tecnologias Verdes e Inovação Sustentável, ao viabilizar a obtenção de dados contínuos e confiáveis sobre a dinâmica da água em pontos suscetíveis ao acúmulo hídrico.

Introdução

Desde a década de 1970, a região Sudeste do Brasil tem apresentado aumento na intensidade e na duração dos eventos de precipitação, com antecipação do período chuvoso e maior persistência das chuvas ao longo do tempo [1]. Esse cenário, intensificado pelas mudanças climáticas, impõe desafios significativos à infraestrutura urbana, especialmente em áreas densamente ocupadas e com planejamento inadequado. O processo de urbanização tem contribuído para elevados níveis de impermeabilização do solo [2], [3], reduzindo a capacidade de infiltração da água e aumentando os riscos de alagamentos e deslizamentos [4].

Sistemas de drenagem urbana frequentemente se mostram insuficientes para lidar com eventos pluviométricos intensos [5], resultando em episódios recorrentes de inundação que impactam diretamente a saúde pública [6], a mobilidade urbana e a integridade do patrimônio. Entre as consequências mais comuns destacam-se a disseminação de doenças de veiculação hídrica, danos materiais e, em casos mais severos, a ocorrência de fatalidades [7]. A ausência de sistemas eficientes de monitoramento e alerta agrava esses impactos [8].

Um exemplo representativo desse cenário é a recorrência de alagamentos nas proximidades do campus do CEFET/RJ, no Rio de Janeiro [9], evidenciando limitações na infraestrutura urbana e a necessidade de soluções tecnológicas voltadas à prevenção e mitigação de riscos. Nesse contexto, a implementação de sistemas de monitoramento em tempo real e o aprimoramento das estratégias de drenagem tornam-se medidas essenciais para o aumento da resiliência urbana [5].

Paralelamente ao contexto urbano, a medição do nível de água também desempenha papel fundamental em sistemas agrícolas, como no cultivo de arroz irrigado, em que o controle da lâmina de água é determinante para a produtividade, o uso eficiente dos recursos hídricos e a sustentabilidade do sistema produtivo.

Diante desse contexto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de baixo custo para monitoramento em tempo real do nível de água, orientado prioritariamente ao acompanhamento de áreas urbanas suscetíveis a alagamentos. A solução apresenta aderência direta às áreas de Geotecnologias e Monitoramento Ambiental, Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis e Tecnologias Verdes e Inovação Sustentável, por integrar sensoriamento, transmissão remota de dados e emissão automática de alertas em uma arquitetura tecnicamente simples e potencialmente escalável.

De forma complementar, o estudo também dialoga com temas como Desastres Naturais, Mudanças Climáticas e Eventos Extremos, Infraestrutura Verde e Cidades Inteligentes e Recursos Hídricos, ao contribuir para o monitoramento ambiental, a prevenção de riscos e o suporte à tomada de decisão em cenários de vulnerabilidade hidrológica.

Além disso, o sistema contribui para a ampliação da capacidade de observação de eventos hidrológicos, fornecendo suporte à tomada de decisão, ao planejamento urbano e à gestão de recursos hídricos. Dessa forma, o trabalho apresenta caráter interdisciplinar e aplicado, dialogando com diferentes áreas do conhecimento.

Objetivos

Desenvolver e validar, em ambiente controlado, um sistema de baixo custo para monitoramento em tempo real do nível de água, com foco em aplicações de monitoramento ambiental, drenagem urbana e alerta a alagamentos. Especificamente, busca-se: (i) medir a altura da coluna de água com precisão adequada a aplicações de alerta; (ii) transmitir dados em tempo real para uma plataforma digital; (iii) emitir alertas automáticos em situações críticas; e (iv) avaliar o potencial da solução como ferramenta de apoio à gestão hídrica urbana e à resiliência frente a eventos hidrológicos extremos.

Metodologia

Este projeto desenvolveu um sistema de hardware e software para monitorar condições ambientais e enviar dados em tempo real para uma plataforma de Internet das Coisas (IoT). O hardware é composto por um microcontrolador ESP32, que fornece conectividade Wi-Fi e Bluetooth, um sensor de pressão piezoresistivo com interface de aquisição HX711 para medição

da altura da coluna de água (ACA) e um sensor DHT22 para temperatura e umidade relativa. O sensor de pressão opera na faixa de 0–100 kPa com precisão de ±0,25% da escala total, garantindo resolução suficiente para detectar pequenas variações de nível. O DHT22 mede temperatura de -40 a 80 °C com precisão de ±0,5 °C e umidade relativa de 0 a 100% com precisão de ±2% UR, permitindo correlacionar as condições ambientais com eventos de inundação. O circuito eletrônico é simples, de baixo custo e montado em uma placa de circuito impresso (PCI) de face simples, discreta para minimizar o risco de vandalismo.



Figura 1: Gráfico exibido na plataforma ThingSpeak.

1. Arquitetura do sistema

Os dados são transmitidos para a plataforma ThingSpeak, onde podem ser visualizados em tempo real; a Figura 1 mostra um exemplo do gráfico gerado, possibilitando a análise das variações do nível da água e a rápida identificação de valores críticos. A fonte de alimentação é implementada de forma versátil, como mostrado nas Figuras 2 e 3, utilizando um carregador de telefone celular padrão conectado diretamente à placa de circuito para garantir uma fonte estável para operação contínua.

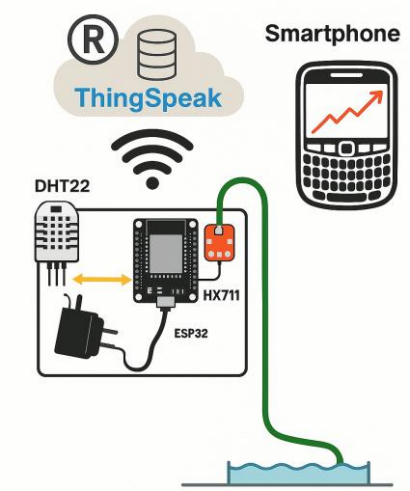


Figura 2: Representação esquemática do sistema desenvolvido.

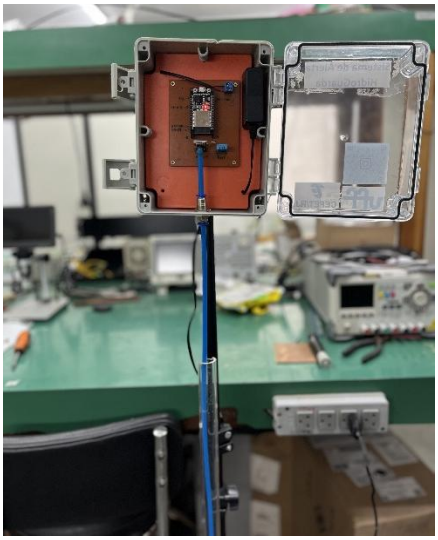


Figura 3: Equipamentos de IoT prontos para testes em campo.

2. Aquisição, transmissão e alerta de dados

O software do sistema embarcado foi desenvolvido utilizando o Arduino® IDE (versão 2.3.4), que simplifica a programação por meio de uma ampla variedade de bibliotecas para integração de sensores e conectividade com a Internet. O microcontrolador ESP32, equipado com Wi-Fi, envia dados em tempo real para a plataforma ThingSpeak [9], permitindo que os usuários visualizem os níveis de inundação por meio de gráficos interativos. A integração com o ThingSpeak é simplificada pela disponibilidade de tutoriais completos.

Uma característica fundamental do software é sua função de alerta automático. O ESP32 monitora continuamente a altura da coluna de água (ACA) e, quando ela excede um limite crítico, envia um e-mail de alerta (em português) para uma lista predefinida de usuários, incluindo autoridades locais e equipes de emergência [10]. Esse sistema de alerta utiliza bibliotecas específicas para permitir a comunicação segura com servidores de e-mail, garantindo notificações oportunas.

A Figura 4 mostra um exemplo da mensagem de alerta enviada após a detecção do nível crítico. O software foi rigorosamente testado para garantir a confiabilidade na aquisição, transmissão e geração de alertas de dados, tornando o sistema uma ferramenta robusta e eficiente para o monitoramento de enchentes e a gestão de riscos.



Figura 4: Alerta por e-mail recebido pelo usuário quando o nível de inundação atinge um nível crítico.

3. Procedimento de calibração e validação

O sensor de pressão utilizado (HX711 acoplado a um transdutor de pressão piezoresistivo) foi escolhido por sua sensibilidade e precisão adequadas à faixa de medição da altura da coluna de água (ACA) (0–80 cm). Esse tipo de sensor apresenta precisão nominal de ±0,25% da escala total e resolução de 24 bits, permitindo a detecção de pequenas variações de pressão.

A calibração do sistema é necessária para compensar a influência da pressão atmosférica, que adiciona um componente à pressão medida e pode comprometer a precisão da estimativa da ACA. Para isso, a calibração foi realizada submergindo a mangueira pneumática em profundidades conhecidas, em um recipiente graduado, simulando níveis de inundação de 0 a 80 cm. Para cada profundidade, foram realizadas três medições independentes, sendo utilizada a média para reduzir o ruído de leitura e aumentar a confiabilidade dos dados.

No total, foram coletados nove pontos de calibração, com incrementos de 10 cm na ACA, variando de 0 cm a 80 cm, permitindo a construção de uma curva de calibração robusta. As leituras de pressão P, obtidas pelo sensor HX711 e expressas em unidades arbitrárias (au), foram correlacionadas com os valores reais de ACA (cm) e ajustadas por meio de regressão linear, resultando na equação de calibração (Eq. 1):

$$ACA = a \cdot P + b \tag{1}$$

onde ACA é Altura da Coluna de Água, em cm, a e b são os coeficientes determinados pelo método dos mínimos quadrados, P é a pressão em unidades arbitrárias fornecida pelo sensor HX711, com um coeficiente de determinação de R^2 = 0,998, indicando um excelente ajuste. A curva resultante é mostrada na Figura 5.

Essa calibração garante que, durante a operação, o software possa converter os valores de pressão medidos em valores reais de ACA, mantendo a precisão mesmo sob condições atmosféricas variáveis. O limite de alerta crítico foi definido em 70 cm, com base em parâmetros de segurança de condições de inundação simuladas em laboratório.

Tabela 1: Tabela de Calibração: Pressão vs. ACA

ACA (cm)	Pressão (*P a.u.*)
0	0
10	120
20	245
30	370
40	495
50	620
60	745
70	870
80	995

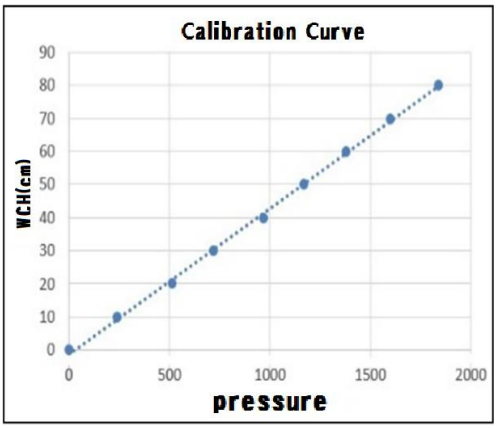


Figura 5: Curva de calibração da ACA.

4. Potencial de aplicação em monitoramento ambiental e drenagem urbana

O sistema desenvolvido apresenta elevado potencial de aplicação em diferentes contextos de monitoramento ambiental, especialmente em áreas urbanas suscetíveis a alagamentos e falhas nos sistemas de drenagem. A capacidade de aquisição e transmissão de dados em tempo real permite o acompanhamento contínuo do nível de água em pontos críticos, como vias públicas, galerias pluviais, canais urbanos e áreas sujeitas ao acúmulo hídrico.

Nesse contexto, a solução proposta pode contribuir para a identificação precoce de situações de risco, possibilitando a emissão de alertas e o apoio à tomada de decisão por parte de gestores públicos, equipes técnicas ou usuários locais. A disponibilidade de informações em tempo real favorece ações preventivas e respostas mais rápidas diante de eventos de inundação.

Além disso, o sistema se insere no escopo de estratégias voltadas à drenagem urbana sustentável, ao permitir o monitoramento do comportamento hidráulico em ambientes urbanos e fornecer subsídios para o planejamento, operação e avaliação de sistemas de drenagem.

Dessa forma, a proposta também se relaciona com ações de adaptação a eventos extremos associados às mudanças climáticas, contribuindo para o aumento da resiliência urbana e para a gestão mais eficiente dos recursos hídricos em diferentes cenários de aplicação.

Conclusão

O desenvolvimento de um sistema de monitoramento de enchentes em tempo real utilizando o microcontrolador ESP32 representa um avanço significativo na proposição de soluções acessíveis para a gestão hídrica em ambientes urbanos e agrícolas. O sistema integra hardware e software para medir a altura da coluna de água (ACA) e transmite os dados para a plataforma ThingSpeak, permitindo a visualização em tempo real e contribuindo para o monitoramento ambiental. Ensaios laboratoriais em ambiente controlado confirmaram a precisão do sistema, sustentada por uma curva de calibração bem definida para o sensor de pressão HX711, que apresentou comportamento linear com $R^2 > 0,99$ e margem de erro de aproximadamente ±1 cm, adequada para aplicações de alerta de alagamentos e manejo da lâmina de água.

O protótipo também realiza o envio automático de alertas por e-mail quando níveis críticos de ACA são atingidos. Seu baixo custo e simplicidade tornam o sistema adequado para aplicação em áreas urbanas em desenvolvimento, bem como em sistemas agrícolas, como o cultivo de arroz irrigado, com potencial de uso em contextos residenciais, comerciais, industriais e produtivos.

Atualmente classificado como TRL 6, o sistema foi validado em ambiente simulado, apresentando resultados quantitativos que demonstram a confiabilidade das medições. O avanço para TRL 7 exigirá testes em campo para avaliação do desempenho em condições reais, incluindo exposição a variações de umidade, temperatura e outros fatores ambientais, uma vez que mudanças térmicas abruptas podem introduzir pequenas flutuações nas leituras. A durabilidade e a confiabilidade em longo prazo permanecem como desafios relevantes.

A funcionalidade do sistema pode ser ampliada com a integração de sensores adicionais e o desenvolvimento de interfaces mais intuitivas, tornando-o mais versátil e acessível a usuários não especializados. Do ponto de vista social, a solução apresenta potencial para salvar vidas e apoiar respostas mais rápidas por parte das autoridades, especialmente em áreas suscetíveis a alagamentos, como o entorno do CEFET/RJ, além de contribuir para o uso mais eficiente dos recursos hídricos em sistemas agrícolas.

Em síntese, o protótipo demonstrou potencial como ferramenta eficiente e de baixo custo para monitoramento ambiental do nível de água, com aplicação prioritária em drenagem urbana, alerta de alagamentos e apoio à gestão hídrica em áreas suscetíveis a eventos extremos. Sua aderência às áreas de Geotecnologias e Monitoramento Ambiental, Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis e Tecnologias Verdes e Inovação Sustentável decorre da integração entre sensoriamento, conectividade e geração de informação útil à prevenção de riscos e à resiliência urbana. Estudos futuros deverão incluir testes em campo e validação em condições reais de operação.

Este projeto foi desenvolvido no âmbito da disciplina Sensores e Internet das Coisas II do curso de Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense.

Agradecimentos

Caio M. da Silva agradece ao CNPq pelo apoio concedido por meio da bolsa ITI, vinculada ao projeto nº 406600/2022-8. Beatriz Q. S. Rodrigues e Dr. Alexander Cascardo agradecem à FAPERJ pelo apoio no âmbito do Programa Doutor Empreendedor, processo nº E-26/290.153/2026. M.Sc. Weber S. Gaia F. e Dr. Andrés Pablo López Barbero agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro por meio da bolsa DTI-C, vinculada ao projeto nº 406600/2022-8, bem como à Prefeitura Municipal de Niterói, no âmbito do Projeto PDPA. Caio M. da Silva, Thiago Q. da Silva e Beatriz Q. dos S. Rodrigues são alunos de graduação do curso de Engenharia de Telecomunicações da UFF.

Referências Bibliográficas

[1] J. Melo Júnior, G. Sediyama, P. A. Ferreira, B. G. Leal e R. B. Minuzzi, "Distribuição espacial da frequência de chuvas na região hidrográfica do Atlântico Leste de Minas Gerais," Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2006.

[2] G. Oliveira, E. Schimanowski, D. Maicá, D. Lopes e C. Legonde, "Problemas causados pela impermeabilização do solo devido à urbanização," em Seminário de Iniciação Científica, 2020.

[3] K. Santos, I. Rufino e M. Barros Filho, "Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo," Engenharia Sanitária e Ambiental, vol. 22, nº 5, pp. 943–952, 2017.

[4] R. Sherem, "Urbanização na planície do rio Gravataí-RS," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

[5] E. Lopes, H. Silva, M. Silva, M. Lopes e R. Silva, "Os potenciais impactos gerados por enchentes e inundações," 2022. [Online]. Disponível em: https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstreams/f39b8b30-4488-4e33-a1be-f02f39e4825c/download. Acesso em: 29 mar. 2026.

[6] C. Freitas e E. Ximenes, "Enchentes e saúde pública: uma questão na literatura científica recente," Ciência e Saúde Coletiva, 2012.

[7] G1 Campinas e Região, "Mulher morre após carro ser arrastado durante enchente em Mogi Mirim, dizem bombeiros," 2020. [Online]. Disponível em: https://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/noticia/2020/01/12/mulher-morre-apos-carro-ser-arrastado-durante-enchente-em-mogi-mirim.ghtml. Acesso em: 29 mar. 2026.

[8] J. Ferreira, J. Silva e W. Becker, "Plamona – plataforma de monitoramento do nível de águas," em ENCIF, 2018.

[9] Jornal Extra, "Vídeo mostra chuva invadindo campus do Cefet no Maracanã," 2016. [Online]. Disponível em: https://extra.globo.com/noticias/rio/video-mostra-chuva-invadindo-campus-do-cefet-no-maracana-18865149.html. Acesso em: 29 mar. 2026.

[10] Random Nerd Tutorials, "ESP32 publish sensor readings to ThingSpeak," 2024. [Online]. Disponível em: https://randomnerdtutorials.com/esp32-thingspeak-publish-arduino/. Acesso em: 29 mar. 2026.

[11] Random Nerd Tutorials, "ESP32 send emails using an SMTP server," 2024. [Online]. Disponível em: https://randomnerdtutorials.com/esp32-send-email-smtp-server-arduino-ide/. Acesso em: 29 mar. 2026.

AVALIAÇÃO LIMNOLÓGICA DO CÓRREGO DO TRAÍRA NO PARQUE BERNARDO BERNECK, VÁRZEA GRANDE - MT

1 Yasmim Rolim de LIMA, 2 Letycia Rolim de LIMA, 3 Camila Tatiane Santana JEK
1,2,3 Universidade Federal de Mato Grosso - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, camila.jek@sou.ufmt.br;
Universidade Federal de Mato Grosso - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Letycia.lima@sou.ufmt.br;
Universidade Federal de Mato Grosso - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; yasmim.lima4@sou.ufmt.br;

Palavras-chave: Córrego, comunidade Planctônica e limnologia.

Resumo

O objetivo principal desta avaliação é analisar as condições limnologicas do córrego do Traíra, está situado no Parque Bernardo Berneck, no município de Várzea Grande- MT. O córrego localiza-se nas coordenadas -15,6476715S e -56,1700142W, afluente do Rio Cuiabá, pertencente a Bacia hidrográfica principal do Alto Paraguai. Considerando seus aspectos físicos, químicos e biológicos do córrego. As variáveis temperatura da água, potencial hidrogeniônico e oxigênio dissolvido obtemos por meio de aparelhos digitais, multiparametricos portáteis nesse sentido, as comunidades zooplanctônicas são importantes componentes na cadeia alimentar considerando os produtores primários A coleta de organismos aquáticos, da comunidade planctônica do córrego do Traíra, seguiu os padrões normativos aplicáveis, assim buscamos coletar apenas fitoplânctons e os zooplânctons, O zooplâncton foi coletado pelo método de filtragem de volume conhecido, totalizando 52 litros por amostra, o fitoplâncton foi obtido por arrasto horizontal com rede de plâncton, com cinco repetições para garantir representatividade. Posteriormente, as amostras foram encaminhadas ao laboratório do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, da Universidade Federal do Mato Grosso, onde passaram por análise em microscópio binocular, com identificação taxonômica até nível de gênero, conforme literatura especializada. (BICUDO; MENEZES, 2017). Com isso, predominância de certos grupos taxonômicos permite inferir sobre a qualidade ecológica e ambiental do ponto amostrado, sendo preciso expressiva a presença principalmente das Euglenophyta e Cianobactérias, vale ressaltar a presenças das diatomáceas e larvas de copépodes *(Cyloclops sp.)* aponta um sistema com grande disponibilidade de alimento com capacidade sustenta esses níveis tróficos.

Introdução

O presente trabalho ambiental reúne resultados obtidos pela visita técnica no Parque Berneck, situado em Várzea Grande/MT, no Córrego do Traíra. A coleta de organismos aquáticos, da comunidade planctônica do córrego do Traíra, seguiu os padrões normativos aplicáveis. Assim, a turma realizou a coleta em quatro pontos distintos do parque para investigar e identificar os organismos aquáticos ofertando informações técnicas que apoiem a gestão ambiental do parque.

Nesse sentido, o trabalho busca fortalecer ações voltadas a melhoria dos estudos das comunidades aquáticas e do ambiente em que vivem. Foram investigadas técnicas de cultivo de algas, com protocolos laboratoriais específicos, uso de bibliografias técnicas e chaves taxinômicas para identificação das espécies.

Segundo Tundisi (1999), o desenvolvimento econômico e social dos países está fundamentado na disponibilidade de água de boa qualidade e na capacidade de conservação e proteção dos recursos hídricos. E a água, como elemento essencial à preservação da vida, tornase bem mensurável e, como bem vaporável, se apresenta hoje com preço elevado, pois, ao contrário do que se imagina, a água deve ser avaliada como recurso limitado.

Considerando as interações entre os organismos aquáticos e terrestres observados no ecossistema do parque foi possível a elaborar e descrever cadeia alimentar do ecossistema. Entre os produtores primários, a base da cadeia, estes que convertem a energia solar em matéria orgânica por fotossíntese estão os fitoplâncton, as algas microscópicas presentes na coluna d'água do córrego como também macrófitas aquáticas que vivem nas margens ou submersas, servindo de abrigo e alimento. Além da mata ciliar que fornece frutos folhas e insetos para o sistema aquático.

Logo em seguida tem-se os consumidores primários que se alimentam diretamente dos produtores que são os zooplânctons, os pequenos crustáceos rotíferos que filtram os fitoplâncton além de peixes herbívoros que se alimentam ou de frutos que caem das matas ciliares.

O objetivo do presente trabalho é avaliar a qualidade da água da Região Limnética da lagoa não isolada como também do córrego do Traíra afluente do Rio Cuiabá que perpassa dentro do parque Bernardo Berneck em Várzea Grande-MT) por meio de coleta e análise de amostras, correlacionando parâmetros físico- químicos da comunidade planctônica com as condições ambientais observadas, incluindo a identificação e caracterização da vegetação aquática presente no local.

As comunidades planctônicas são essenciais na produção primária e na transferência de energia nos ecossistemas aquáticos. (WETZEL, 2001).

Material e Métodos

O campo de estudo está situado no Parque Bernardo Berneck, no município de Várzea Grande- MT. O corrégo localiza-se nas coordenadas -15,6476715S e -56,1700142W, especificamente no Córrego do Traíra. Em conjuntura, se faz necessário a caracterização do local, o bioma é o cerrado apresenta um clima tropical, caracterizado por duas estações definidas: uma chuvosa, que se estende de Outubro até Abril, e outra seca, predominante entre Maio e Setembro. A precipitação média anual situa-se em

torno de 1.445 mm, com forte concentração nos meses da estação úmida. Durante a estação seca os índices pluviométricos reduzem-se significativamente. Já na estação úmida os períodos de chuva intensificam-se.



Figura 1 -Mapa de localização do parque Berneck.
Fonte - Autoria própria (2025).

Dessa modo, no momento da coleta no ponto em questão, em 10 de dezembro de 2025, no período da manhã por voltas das oito e meia da manhã o entorno se caracteriza por uma área de fácil acesso onde foi possível a realização dos procedimentos de coleta por arrasto e filtragem direta no que se refere a cobertura vegetal por margens protegidas com mata ciliar que acompanha o córrego com mistura de plantas nativas e invasoras com vegetação natural densa, que atua na proteção do solo contra erosão e como filtro biológico para poluentes. Ademais, as condições climáticas no momento eram úmidas com temperatura de 28 °C marcado por umidade relativa alta, céu nublado e resquícios de precipitação recente.

Vale destacar, o aspecto da água que se mostrava bem diluída com mau cheiro com presença de rochas e resíduos sólidos como pneu e garrafas de plástico na margem. O córrego é um ambiente lótico possuía uma presença significativa de sedimentos em suspensão, o que influenciou a decisão técnica de preservar as amostras de fitoplâncton imediatamente (Figura 2).



Figura 2. Local da coleta - Córrego do Traíra
Fonte: Autoria Própria (2025).

As atividades de campo envolveram a caracterização do local de coleta por meio de registros fotográficos, descrição ambiental e preenchimento de ficha de campo. Foram realizadas mensurações limnológicas, incluindo temperatura da água, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, turbidez e sólidos dissolvidos, utilizando sonda multiparâmetros portátil.

A coleta qualitativa das comunidades aquáticas foi feita com rede de plâncton, balde graduado e frascos de polietileno. O zooplâncton foi coletado pelo método de filtragem de volume conhecido, totalizando 52 litros por amostra.



Figura 3 - Coleta de zooplâncton, no Parque Berneck
Autoria próprio. (2025).

A coleta do material biológico foi realizada conforme ilustrado na Figura 1, utilizando uma rede de plâncton para a concentração dos organismos.

Utilizou-se o método de filtragem de volume conhecido para a amostragem do fitoplâncton. A utilização de redes de plâncton é uma das técnicas mais comuns para a coleta de organismos aquáticos microscópicos, permitindo a amostragem qualitativa e quantitativa.(APHA, 2017).

O fitoplâncton foi obtido por arrasto horizontal com rede de plâncton, com cinco repetições para garantir representatividade. As amostras foram imediatamente preservadas em álcool etílico 100%.

Devido à alta turbidez da água, não foram mantidas amostras vivas, e não houve coleta de perifíton no ponto analisado. O georreferenciamento foi realizado com auxílio de celular, registrando as coordenadas dos pontos amostrais.

Posteriormente, as amostras foram encaminhadas ao laboratório do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA/UFMT), onde passaram por análise em microscópio binocular, com identificação taxonômica até nível de gênero, conforme literatura especializada. (BICUDO; MENEZES, 2017).

A coleta desses microrganismos são de grande importância para a verificação da qualidade da agua do córrego estudado. Pois, As comunidades planctônicas respondem rapidamente às mudanças ambientais, sendo importantes indicadores da qualidade da agua. (TUNDISI, 2008).

Resultados e Discussões

Durante a realização da coleta, análises físico-químicas utilizando sonda multiparâmetros foram efetuadas.

Tabela 01 - Resultados dos Parâmetros Físico-químicos do Córrego Traíra.

Parâmetro	Resultado Obtido	Unid.	Conama357/05- Classe2
pH	7,33	-	6,0 - 9,0
Temperatura	27,1	°C	-
Condutividade elétrica	455	µS/cm	-
Sólidos Dissolvidos Totais	290	mg/L	≤500mg/L
Oxigênio Dissolvido	6,8	mg/L	≥5,0mg/L

Fonte: Autoria Própria. (2026).

A concentração de oxigênio dissolvido (OD) foi de 6,8 mg/L, estando acima do nível exigido, impondo boa oxigenação e sendo crucial para vida aquática. Assim, a condutividade elétrica expressou diante da medição o valor de 455 µS/cm, por mais que não haja limite imposto na resolução Conama 357/2005, valores excessivos de condutividade podem expressar possíveis influências antrópicas.

Os Sólidos Totais Dissolvidos foram quantificados em 290 mg/L, estando abaixo do exigido, expressando baixa substâncias dissolvidas. O pH referente a análise indicou um resultado de 7,33, indicando um ambiente levemente alcalino.

Por fim, os resultados indicam que todos os parâmetros analisados se encontram dentro dos limites estabelecidos pela resolução CONAMA 357/2005 para aguas doces de Classe 2, demostrando condições adequadas para a manutenção da vida aquática.

O fitoplâncton é formado por micro-organismos fotossintetizantes que vivem suspensos na coluna d'água, constituindo a base da cadeia alimentar aquática e funcionando como importantes bioindicadores de qualidade da água.

Entre as espécies identificadas, destacaram-se como mais abundantes *Craticula sp*, *Euglena spp.* e *Heteroleibleinia sp*. No córrego Traíra foram encontrados com presente significância de euglenófitas e cianobactérias por apresentarem alta carga orgânica. No que diz respeito ao zooplâncton, foram verificados organismo do grupo dos rotíferos e copépodes. O gênero Proales sp teve aula frequência de forma abundante.

Conclusão

Em primazia pela caracterização ambiental e em seguida pela nas análises feitas em laboratório no que diz respeito a comunidade planctônica presente no córrego do Traíra, tem-se uma assertiva revelação do ecossistema que reflete as condições típicas que um corpo hídrico urbano deve apresentar visto que está sob influências das condições sazonais, emissões de poluentes e carga sedimentar.

Desse modo, a predominância de certos grupos taxonômicos permite inferir sobre a qualidade ecológica e ambiental do ponto amostrado, sendo preciso expressiva a presença principalmente das Euglenophyta e Cianobactérias dos gêneros Euglena sp. *Lepocinclis sp. e Phacus sp*.com as presenças de Cianobactérias do gênero *Oscillatoria sp. E Planktothrix sp*.

No qual demonstra que um ponto um é um ambiente com carga elevada de matéria orgânica e nutrientes. Em razão, de prosperarem em locais com decomposição ativa e oxigênio baixo o que caracteriza córregos urbanos uma vez que recebem efluentes ou escoamento de rios com muitos detritos.

Nesse viés, vale ressaltar a presenças das Diatomáceas no qual forma identificados os gêneros como ***a*** *Craticula sp., Gomphonema sp. E Gyrosigma sp.* A comunidade zooplantônica, pela presença de rotíferos como *as Proales sp., Trichocerca sp*. e larvas de copépodes *(Cyloclops sp.)* aponta um sistema com grande disponibilidade de alimento com capacidade sustenta esses níveis tróficos.

Assim sendo, com a melhoria da autodepuração e oxigenação além do monitoramento na gestão de resíduos, logo assuma-se que a proposta de restauração apresentadas não só conduziria a um restabelecimento do córrego, mas também uma proteção ambiental e turística para o Parque Bernardo Berneck.

Desta forma, é importante entender-se o comportamento dos parâmetros aquáticos dos ecossistemas que compõem as bacias hidrográficas, pois se verifica que estudos realizados ao longo dos anos, demonstram uma estreita relação entre a degradação dos recursos hídricos e as ações antrópicas, sobretudo em áreas urbanizadas (ARAÚJO JUNIOR; TAVARES JUNIOR, 2018; VALLIM; TRAVASSOS, 2019).

Agradecimentos

Em primazia, os autores gostariam de agradacer a Deus, a professora Daniela Maimoni Figueiredo, nossa orientadora, pelo incentivo e todo conhecimento compartilhado ao longo do processo. Manifestamos também a nossa gratidão aos nossos colegas de projeto pela facilitação ao estudo e atividade em conjunto exercidas tanto em campo durante a coleta, mas também nas análises em laboratório.

Referências Bibliográficas

APHA. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23. ed. Washington: American Public Health Association, 2017.

BICUDO, C. E. de M.; MENEZES, M. Gêneros de algas de águas continentais do Brasil: chave para identificação e descrições**.** 3. ed. São Carlos: RiMa, 2017.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 18 mar. 2005.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Manual de Coleta de Amostras de Água para Monitoramento da Qualidade. São Paulo: CETESB, 2015.

Santos et. al. Aspectos limnológicos e sanitários do trecho urbano do Córrego João Dias em Aquidauana – Mato Grosso do Sul. Revista Pantaneira, V. 20, UFMS, Aquidauana-MS, dezembro de
2021.

TUNDISI, José Galizia; TUNDISI, Takako Matsumura. Limnologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

TUNDISI, J. G. Limnologia no Século XXI: Perspectivas e Desafios. Internacional Institute of Ecology / Apresentado ao VII Congresso Brasileiro de Limnologia, Florianópolis - SC, 1999.

VALLIM, E. M.; TRAVASSOS, L. R. F. C. Impasses sobre a urbanização e a produção de água no sistema produtor alto Tietê: estudos sobre a evolução da mancha urbana e impactos ambientais no município de SuzanoSP. Revista Geografia em Atos, Presidente Prudente, v. 1, n. 9, p. 5-22, 2019.

WETZEL, Robert G. *Limnology: lake and river ecosystems*. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2001.

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE SOLO E SUA INFLUÊNCIA NA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA NA ENCOSTA DA SERRA DO CURRAL, BELO HORIZONTE

1 Carolina Matos Braga, 2 José Ribeiro Canuto, 3 Emanuele Muniz Ramos, 4 Bruna Luz Farias, 5 Luiz Carlos da Cruz

1 UniBH, e-mail: carol.matosbraga@gmail.com; 2 UniBH, e-mail: josercanuto27@gmail.com; 3UniBH, e-mail: somared05@gmail.com; 4UniBH, e-mail: brunnapradiefarias@gmail.com; 5UniBH, e-mail: luiz.c.cruz@ulife.com.br

Palavras-chave: Análise granulométrica; mecânica dos solos; caracterização geotécnica.

Resumo

O estudo apresenta a caracterização granulométrica de um solo de uma encosta da Serra do Curral, no bairro Mangabeiras, em Belo Horizonte (MG), área de elevada declividade e marcada por um movimento de massa ocorrido no ano de 2018, associado a chuvas intensas. Este trabalho teve como objetivo compreender o comportamento geotécnico do solo e sua relação com a instabilidade da encosta em um contexto urbano. A metodologia consistiu na realização do ensaio de análise granulométrica por peneiramento, conforme a ABNT NBR 7181, e a partir dos dados obtidos, foi construída a curva granulométrica e determinados os diâmetros característicos D10, D30 e D60, bem como os coeficientes de uniformidade (Cu) e curvatura (Cc). Os resultados indicaram D10 = 0,19 mm, D30 = 0,50 mm e D60 = 0,89 mm, com Cu = 4,68 e Cc = 1,48, classificando o solo como areia média, moderadamente graduada, com baixa presença de finos. Essas características revelam elevada permeabilidade e bom potencial de drenagem, porém associadas a maior suscetibilidade à instabilidade quando submetido à saturação hídrica em encostas íngremes, ressaltando a necessidade de monitoramento e medidas de contenção na área estudada.

Introdução

Os estudos de caracterização granulométrica de solos associados à suscetibilidade a movimentos de massa constituem uma abordagem amplamente reconhecida na literatura geotécnica, geomorfológica e hidrológica, tanto no Brasil quanto em contextos internacionais. A distribuição granulométrica exerce influência direta sobre propriedades fundamentais do solo, que desempenham um papel importante na estabilidade das encostas, podendo influenciar o movimento de massa pela ação hídrica no perfil intemperizado (SELBY, 1993).

No Brasil, regiões serranas compostas por perfis de intemperismo espesso, como a Serra do Mar, a Serra da Mantiqueira e o Quadrilátero Ferrífero, têm sido amplamente investigadas devido à recorrência de movimentos de massa associados a eventos de precipitação intensa. Trabalhos desenvolvidos por CERRI et al. (2020) na Serra do Mar demonstram que descontinuidades granulométricas ao longo do perfil do solo, especialmente transições entre materiais mais arenosos e horizontes mais finos, favorecem a formação de zonas de concentração de fluxo subsuperficial, elevando as pressões neutras e reduzindo a estabilidade das encostas.

Nesse sentido, o presente estudo consistiu na realização de ensaios de análise granulométrica com o objetivo de determinar a distribuição granulométrica do solo de uma encosta localizada no Complexo da Serra do Curral, no município de Belo Horizonte–MG, onde já se observam registros de movimentos de massa. A área de estudo caracteriza-se por elevada declividade e por apresentar fragilidade geológico-geotécnica, associada principalmente à presença de filito em sua base, rocha metamórfica suscetível a processos de alteração quando exposta à ação da água, que condiciona a formação de solos residuais e coluvionares de comportamento geotécnico sensível. Nesse contexto, a já ocorrência de instabilizações na encosta e a recorrência desse tipo de evento na região reforçam a relevância da investigação, uma vez que esses solos apresentam resposta hidrogeotécnica fortemente influenciada pela saturação, condição em que a granulometria exerce papel fundamental no controle da permeabilidade e da estabilidade das encostas, conforme evidenciado em estudos brasileiros de caracterização geotécnica.

A coleta do material foi realizada em uma encosta situada na Rua João Camilo de Oliveira Torres, na altura do número 66, no bairro Mangabeiras, região Centro-Sul da cidade. Esse local foi afetado por um movimento de massa classificado como fluxo de solo, ocorrido em março de 2018, após um período de elevados índices pluviométricos. De acordo com registros da época, foram acumulados aproximadamente 40 mm de precipitação em um intervalo de cerca de 30 horas, contribuindo para a saturação do solo e o desencadeamento do processo de instabilidade da encosta.

Ressalta-se que a área apresenta altimetria elevada, condição que favorece a ocorrência de chuvas orográficas e potencializa os riscos associados a movimentos de massa. Tal cenário torna-se ainda mais crítico em virtude do elevado adensamento urbano existente na região, caracterizado por construções de alto padrão. No entanto, especificamente na área de estudo, não havia edificações implantadas, sendo observada a presença de solo exposto, coberto por vegetação antropizada e com apenas uma estrutura de contenção pontual localizada na porção central da encosta.

Interessante destacar que o objetivo deste trabalho consistiu em utilizar a distribuição granulométrica do solo como subsídio para a análise do evento ocorrido na região em estudo, especialmente no que se refere às condições e dinâmicas hídricas associadas. A subdivisão das frações granulométricas dos constituintes do solo em classes de tamanho, sejam elas de natureza mineral ou orgânica, auxilia no estabelecimento de grandezas e parâmetros relevantes, conforme destacado por Dias (2004).

Este procedimento é fundamental na caracterização geotécnica dos solos, pois permite determinar, em porcentagem, as dimensões das partículas que compõem uma amostra e os resultados fornecem subsídios importantes para compreender o comportamento dos materiais em diferentes aplicações do ponto de vista geológico e para os estudos de riscos de movimentos em encostas tomadas pelo fator urbano.

Alguns parâmetros são fundamentais para subsidiar as análises geotécnicas e hidrossedimentológicas. Em solos não coesivos, como as areias, o comportamento mecânico e hidráulico está diretamente relacionado ao tamanho e à distribuição dos grãos. Já nos solos coesivos, como as argilas, o comportamento é fortemente influenciado por fatores adicionais, tais como o tipo de argilomineral presente e a história geológica de formação do depósito. Desta forma, a análise granulométrica mostra-se particularmente eficiente para materiais como areias e siltes, fornecendo dados técnicos relevantes e de aplicação prática em diferentes estudos e intervenções.

O experimento realizado foi regido pela norma brasileira NBR 7181 e, a partir dos resultados obtidos, foi possível construir a curva de distribuição granulométrica que desempenha papel essencial na identificação e classificação dos solos, trazendo definições como Diâmetro Efetivo, Coeficiente de Uniformidade e Coeficiente de Curvatura. Esses parâmetros são essenciais na caracterização do solo e compreensão das suas características físicas e hidráulicas.

A fim de caracterizar tais, o Diâmetro Efetivo (D10) é definido como o tamanho de partícula abaixo do qual se encontra 10% da massa total do solo. Este valor é amplamente utilizado na estimativa da permeabilidade, sendo um indicador-chave em obras de drenagem, barragens e sistemas de contenção. Além disso, o D10 serve de base para o cálculo de outros coeficientes granulométricos, como Cu e Cc, o que reforça sua importância na análise integrada do solo.

O Coeficiente de Uniformidade (Cu), calculado pela razão entre D60 e D10, expressa o grau de variação dos tamanhos de partículas em uma amostra. Solos com baixo Cu são considerados uniformes, apresentando partículas de dimensões semelhantes, enquanto valores elevados indicam uma boa graduação, com ampla distribuição de tamanhos. Este parâmetro é fundamental para prever o comportamento do solo em relação à compactação, à resistência ao cisalhamento e à estabilidade dos taludes.

O Coeficiente de Curvatura (Cc), obtido a partir dos percentis D10, D30 e D60, permitiu avaliar a forma da curva granulométrica. Valores típicos entre 1 e 3 indicam uma distribuição equilibrada de partículas intermediárias, o que favorece a densidade, a porosidade e a capacidade de suporte do solo. Este coeficiente é especialmente útil na verificação da adequação de materiais para uso em filtros e camadas de transição.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 6502, a classificação dos solos é baseada na dimensão de suas partículas, sendo:

- Pedregulhos: São constituídos por solos minerais ou partículas de rocha, com diâmetro assimilado cerca de 2,0 e 60,0 mm. Podem ainda ser fragmentados em pedregulhos finos, médios ou grossos.
- Areia: Não plástico e não coesivo os sólidos são compostos por pequenos fragmentos de rochas e por minerais possuindo o diâmetro entre 0,06 mm e 2,0 mm. Sendo subdividido em areias grossas, finas e médias.
- Silte: Por possuir baixa ou nenhuma plasticidade, apresenta baixa resistência quando seco. Seus atributos essenciais são correspondentes à parte composta pela fração silte. É constituído por fragmentos com diâmetros entre 0,002 mm e 0,06 mm.
- Argila: solo de graduação fina composto por fragmentos com dimensões inferiores que 0,002 mm, sendo assim apresentam, podendo ser moldado em diferentes formas.

Mediante o exposto, a análise granulométrica da área em questão auxiliou na compreessão da movimentação da encosta, assim como construir conhecimento analítico e aplicado para responder as demandas frente às questões urbanas.

Material e Métodos

A caracterização física do solo foi realizada por meio do ensaio de análise granulométrica por peneiramento. Para a execução dos testes laboratoriais, utilizou-se uma amostra representativa de solo com massa aproximada de 2,0 kg. Os equipamentos empregados compreenderam almofariz de porcelana e mão de gral para a preparação da amostra, balança de precisão, cronômetro, agitador mecânico de peneiras, dispersor elétrico e estufa para secagem do material, além de taras devidamente identificadas para pesagem.

O procedimento experimental seguiu as diretrizes normativas vigentes, iniciando-se pelo destorroamento cuidadoso e homogeneização manual do material. A amostra foi inicialmente submetida a um peneiramento manual prévio na malha de #10 (2,0 mm). O material passante nesta etapa foi transferido para um conjunto de peneiras sobrepostas com aberturas de 1/2", 3/8", #4, #10, #16, #30, #40, #50, #100 e #200, finalizando com o fundo para coleta dos finos.




Figuras 01 e 02: Destorroamento e homogeneização manual (Figura 01) e peneiramento manual em #10 (Figura 02).
Fonte: Acervo pessoal dos autores (2025)

O conjunto de peneiras foi acoplado a um agitador mecânico, operando por um intervalo de 15 minutos para garantir a separação eficiente das frações. Após o peneiramento, procedeu-se à lavagem do material retido em cada peneira para a remoção de partículas finas aderidas aos grãos maiores.




Figuras 03 e 04: Peneiras acopladas em agitador mecânico (Figura 03) e lavagem de material retido (Figura 04).
Fonte: Acervo pessoal dos autores (2025)

As frações retidas foram pesadas e, posteriormente, encaminhadas à estufa para secagem definitiva. Após o período de secagem, realizou-se a pesagem final da massa seca de cada fração, permitindo a quantificação precisa da distribuição granulométrica para posterior construção da curva correspondente.

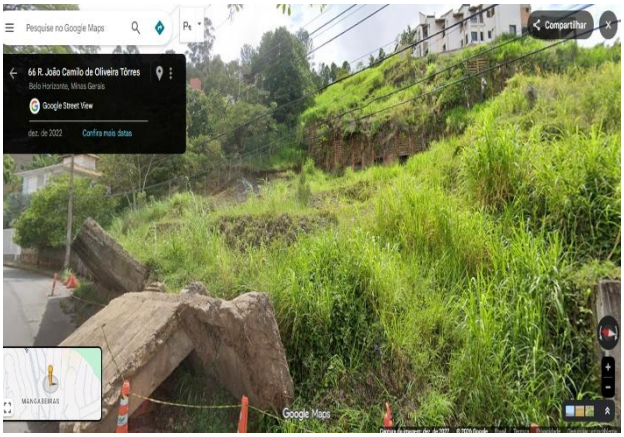


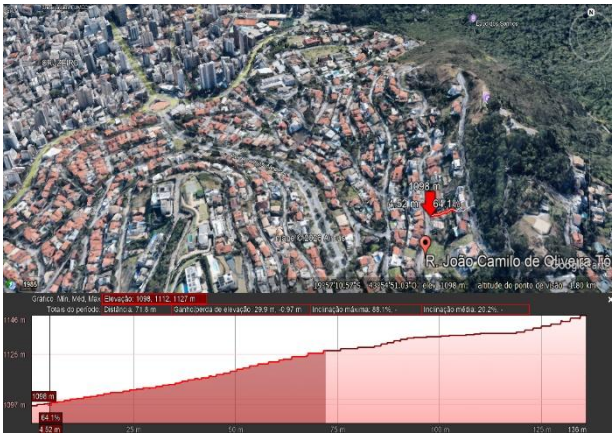


Figuras 05 e 06: Pesagem do material retido pós lavagem (Figura 05) e secagem em estufa (Figura 06).
Fonte: Acervo pessoal dos autores (2025)

Resultados e Discussão

A fim de evidenciar o cenário em questão, Knauer (2007) caracterizou a região geologicamente como situada na unidade estratigráfica supergrupo espinhaço e com composição básica por quartzitos, metaconglomerados, filitos e xistos. A declividade sofre uma alteração de aproximadamente entre 50 e 87% na face voltada para a cidade de Belo Horizonte - MG e com presença de cambissolos háplicos nas médias encostas, característico de serem pouco estáveis e com horizontes pouco diferenciados. Com base no perfil de elevação, a área apresenta uma variação altimétrica de 29 metros em uma distância de 76,3 m lineares e inclinação máxima de 88,1%.





Figuras 07 e 08: Representação da área (Figura 07) e perfil de elevação da área (Figura 08).
Fonte: Adaptação do Google Earth produzida por Luiz C. Cruz (2026)

Os resultados obtidos no ensaio de análise granulométrica estão apresentados na Tabela 1. A partir dos dados de peneiramento, foi possível avaliar a distribuição das partículas da amostra de solo e compreender melhor suas características granulométricas.

PENEIRAMENTO		DADOS				
Malha	Malha	Massa úmida	Massa seca	% Ret.	% Ret.	% Passante
Abertura mesh	Abertura mm	(Kg)	(Kg)	Simples	Acumul.	Acumul.
1/2	12.7	0	0	0	0	100
3/8	9.52	0	0	0	0	100

4	4,75	0	0	0	0	100
10	2	0	0	0	0	100
16	1,18	155,7	116,45	21,45	21,45	78,55
30	0,595	304,5	215,04	39,6	61,05	38,95
40	0,42	125,6	83,95	15,46	76,51	23,49
50	0,297	50,8	33,34	6,14	82,65	17,35
100	0,149	91,8	59,01	10,87	93,52	6,48
200	0,075	54,7	35,2	6,48	100	0
Massa Total	Massa Total	783,2	543			100

Tabela 01: Resultados obtidos pelo ensaio de peneiramento.
Fonte: Tabela gerada pelos autores (2025)

Observa-se, conforme a Tabela 01 de resultados que não houve retenção de material nas peneiras de maior abertura (1/2", 3/8", 4 e 10), evidenciando a eficiência do peneiramento prévio na malha de #10. A maior retenção de material ocorreu nas peneiras intermediárias, especialmente nas peneiras #16 (21,45%), #30 (39,60%) e #40 (15,46%), demonstrando concentração significativa de partículas na faixa de areia média. Além disso, verifica-se que aproximadamente 61,05% do material encontra-se retido até a peneira #30 e cerca de 76,51% até a peneira #40, confirmando a predominância dessa faixa granulométrica.

Além disso, a baixa porcentagem de material passante na peneira #100 (6,48%) demonstra que o solo apresenta pequena quantidade de finos, como silte e argila, característica típica de solos predominantemente arenosos. Esse comportamento pode ser observado tanto na Tabela 01 quanto na curva granulométrica (Figura 09), que apresenta baixa concentração de partículas de granulometria fina.

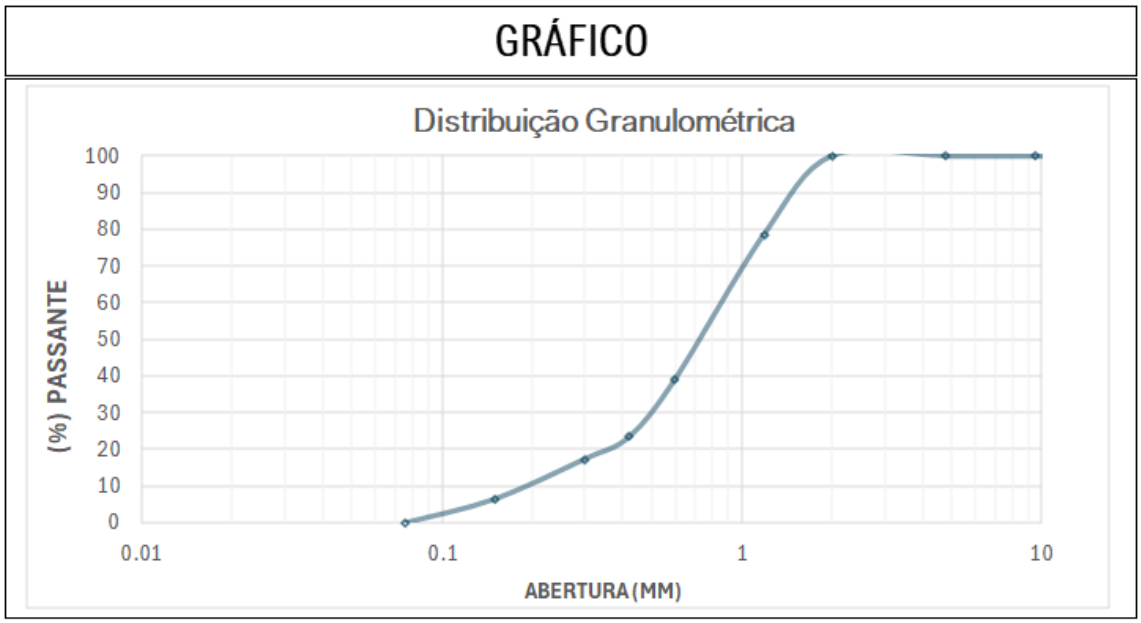


Figura 09: Curva de distribuição granulométrica
Fonte: Gráfico gerado pelos autores (2025)

A curva de distribuição granulométrica obtida a partir dos dados apresenta comportamento contínuo e bem definido, com inclinação mais acentuada na faixa entre 0,4 mm e 1,18 mm, evidenciando concentração predominante de partículas nessa faixa granulométrica. Observa-se também que a curva apresenta transição gradual, sem descontinuidades abruptas, o que indica uma distribuição relativamente uniforme das partículas (Figura 09).

A partir da curva granulométrica, foi possível analisar a percentagem passante acumulada e consequente identificação dos diâmetros característicos (Figura 10) D10, D30 e D60, parâmetros estes fundamentais para a interpretação do comportamento mecânico do solo.

GRÁFICO

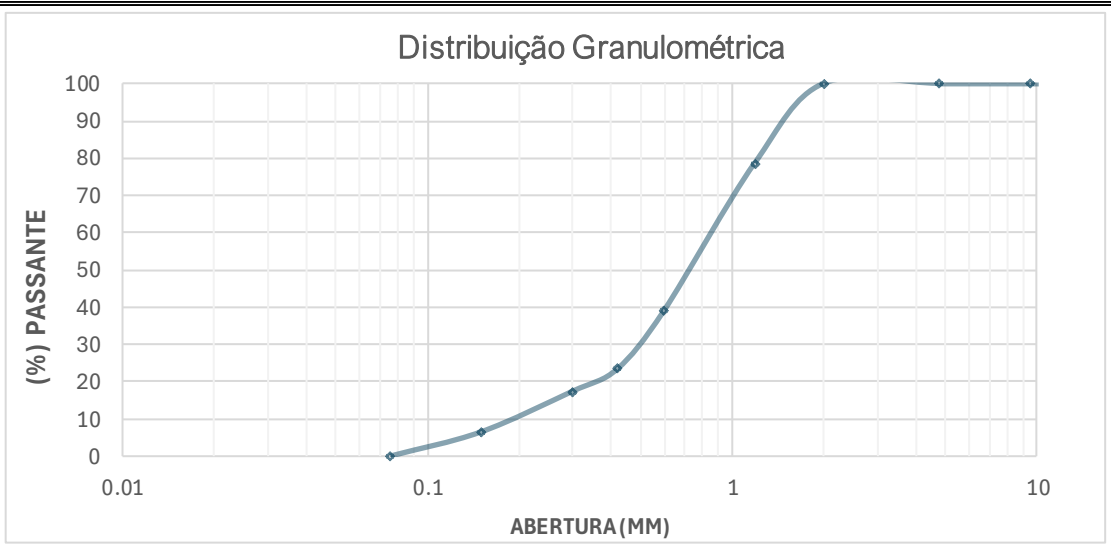


Figura 10: Determinação dos diâmetros característicos do solo.
Fonte: Gráfico gerado pelos autores (2025)

Após a análise dos dados apresentados no gráfico, define-se que:

- D10 = 0,19mm;
- D30 = 0,50mm;
- D60 = 0,89mm.

Com estes valores, temos os cálculos de diâmetro efetivo, que pode ser definido conforme Equação (01), Coeficiente de uniformidade, que pode ser definido conforme Equação (02) e Coeficiente de curvatura, que pode ser definido como Equação (03).

$$Def = D10 \quad (01)$$

Onde: Def é o diâmetro efetivo.

$$Cu = \frac{D10}{Def} \quad (02)$$

Onde: Cu é o Coeficiente de uniformidade.

$$Cc = \frac{(D30)^2}{D60\ x\ D10} \quad (03)$$

Onde: Cc é o coeficiente de curvatura.

Portanto,
$Def = 0{,}19\text{mm}$;
$Cu = 4.68$;
$Cc = 1.48$.

A interpretação desses coeficientes indica um solo com graduação moderada. O valor de Cc situado no intervalo entre 1 e 3 caracteriza uma curva granulométrica contínua, sugerindo que o solo possui uma distribuição uniforme de partículas em sua faixa predominante, o que facilita o rearranjo dos grãos e a redução de vazios durante processos de compactação.

Quanto à classificação granulométrica, a predominância de partículas retidas entre as malhas de 1,19 mm e 0,42 mm permite classificar o material como areia média. A baixa percentagem de material passante na peneira #200 (0,075 mm), correspondente a apenas 0,34%, indica um solo com ínfima presença de finos (silte e argila). Esta característica é altamente positiva para aplicações que exigem alta capacidade de drenagem e baixa plasticidade, confirmando o potencial de utilização do material em aterros controlados e camadas de pavimentação.

Considerações Finais

A caracterização granulométrica do solo, conduzida conforme a norma ABNT NBR 7181, permitiu determinar os parâmetros granulométricos fundamentais e compreender o comportamento geotécnico do material. A determinação dos diâmetros característicos D10, D30 e D60 possibilitou o cálculo dos coeficientes granulométricos e a interpretação da distribuição das partículas

O coeficiente de curvatura obtido (Cc = 1,48) indica uma distribuição granulométrica contínua e equilibrada, favorecendo o rearranjo dos grãos e a redução de vazios durante processos de compactação natural. O coeficiente de uniformidade (Cu = 4,68) indicou uma distribuição granulométrica moderadamente variada, característica comum em solos arenosos com boa capacidade de drenagem.

A predominância de areia média e a baixa presença de finos, evidenciados pelos altos valores de frações retidos nas peneiras de #16, #30 e #40, indicaram que o solo apresenta comportamento não plástico e elevada permeabilidade, características desfavoráveis à região, devido à elevada declividade, o que demanda de monitoramento constate e aplicação de outras estruturas de contenção ao longo da encosta a fim de minimizar outros possíveis movimentos de massa.

Em condições de precipitação intensa, como as registradas durante o evento de março de 2018, a infiltração da água associada à elevada declividade da encosta e à presença de um substrato geológico suscetível contribui para o aumento do grau de saturação do solo, reduzindo sua resistência ao cisalhamento. Essa combinação de fatores cria condições propícias à deflagração de movimentos de massa do tipo fluxo de solo, característicos de materiais inconsolidados com baixa coesão quando submetidos à ação prolongada da água.

Adicionalmente, a altimetria elevada da região favorece a ocorrência de chuvas orográficas, intensificando os processos de infiltração e saturação do maciço. Dessa forma, os resultados laboratoriais mostram-se coerentes com as observações de campo, evidenciando que o comportamento granulométrico do solo é um fator determinante para a compreensão dos processos de instabilidade identificados na encosta estudada, reforçando a importância da análise granulométrica na avaliação geotécnica de áreas suscetíveis a movimentos de massa.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Universitário de Belo Horizonte (UniBH) pela disponibilização da infraestrutura laboratorial e pelo suporte acadêmico que possibilitaram a realização deste trabalho. Manifestam, ainda, especial agradecimento ao Professor Luiz Carlos da Cruz pela orientação e dedicação ao ensino, fundamentais para o desenvolvimento desta atividade e para o aprimoramento da nossa formação acadêmica.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo — Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos - terminologia.** Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

CERRI, Rodrigo I.; ROSOLEN, Vania; REIS, Fábio A. G. V.; PEREIRA FILHO, Augusto José; VEMADO, Felipe; GIORDANO, Lucilia do Carmo; GABELINI, Beatriz Marques. **The assessment of soil chemical, physical, and structural properties as landslide predisposing factors in the Serra do Mar mountain range (Caraguatatuba, Brazil)**. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Heidelberg, v. 79, n. 7, p. 3625–3646, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s10064-020-01791-1.

DIAS, J. Alveirinho. **A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos: uma introdução à oceanografia geológica.** Faro: Universidade do Algarve, 2004.

KNAUER, Luiz Guilherme. **O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural**. Geonomos, Belo Horizonte, v. 15, n. 1, p. 81–90, 2007.

SELBY, Michael John. **Hillslope Materials and Processes**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1993.

ANÁLISE ESPAÇOTEMPORAL DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO EM UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DA MESORREGIÃO NORTE CENTRAL DO PARANÁ

1 Vitória Estela Faccio Lopes, 2 Ligia Flavia Antunes Batista
1 UTFPR, e-mail:vitorialopes@alunos.utfpr.edu.br; 2 UTFPR, e-mail: ligia@utfpr.edu.br

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; NDVI, Landsat.

Resumo

Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto consolidou-se como ferramenta essencial no monitoramento ambiental, fornecendo dados confiáveis em diferentes escalas temporais e espaciais sobre a dinâmica da superfície terrestre. Entre suas aplicações, destaca-se o uso de índices espectrais, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que permite quantificar variações na densidade e vigor da vegetação. O presente estudo teve como objetivo analisar os índices espectrais de vegetação por diferença normalizada em cinco das maiores Unidades de Conservação da mesorregião Norte Central do Paraná, considerando os anos de 2005, 2015 e 2025. Foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 5 (2005) e Landsat 8 (2015 e 2025), obtidas no portal EarthExplorer, além dos limites das unidades disponibilizadas pelo portal Paraná Interativo, das áreas de interesse. Após o pré-processamento das imagens, que inclui etapas como a reprojeção das camadas para o sistema de coordenadas da área de estudo e recorte das Unidades de Conservação de interesse, aplicaram-se as composições falsa-cor R5G4B3 (Landsat 5) e R6G5B4 (Landsat 8) para a visualização da cobertura vegetal e a identificação de possíveis falhas. Em uma das Unidades observaram-se áreas sem vegetação densa em 2005; a consulta à plataforma Brazil Data Cube, que permite obter comportamento temporal do NDVI em pontos específicos, indicou tratar-se de área agrícola, provavelmente registrada em período de colheita. Na etapa seguinte, aplicou-se o NDVI às imagens recortadas de cada unidade de conservação. Os resultados apontaram manutenção da integridade da vegetação, ausência de degradação significativa e aumento progressivo da cobertura vegetal ao longo do período analisado, com 2025 apresentando os maiores valores. Esse comportamento poderia estar relacionado a fatores climáticos; contudo, a análise de dados de precipitação disponíveis na plataforma Google Earth Engine não revelou diferenças significativas entre os anos, sugerindo que a evolução positiva decorre principalmente das políticas de conservação das Unidades. Conclui-se que o sensoriamento remoto constitui ferramenta eficiente para avaliar a preservação de áreas protegidas e verificar o cumprimento da legislação ambiental.

Introdução

As Unidades de Conservação (UCs) representam instrumentos fundamentais para a conservação da biodiversidade e a manutenção dos serviços ecossistêmicos. No Brasil, essas áreas protegidas exercem papel estratégico na mitigação de impactos ambientais, na preservação de recursos naturais e na regulação climática (BRASIL, 2000; Rylands & Brandon, 2005). Estudos indicam que as UCs contribuem significativamente para a conectividade ecológica e para a proteção de habitats naturais, sendo essenciais no enfrentamento dos efeitos das mudanças climáticas (Fonseca *et al*., 2018; Soares-Filho *et al*., 2010), especialmente em regiões com elevada pressão antrópica, como é o caso da mesorregião Norte Central do estado do Paraná.

Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto tem se consolidado como uma ferramenta essencial para o monitoramento ambiental, fornecendo dados confiáveis, em diferentes escalas temporais e espaciais, sobre a dinâmica da cobertura vegetal (Jensen, 2007; Lu *et al*., 2004). A aplicação de índices espectrais, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), permite quantificar com precisão variações na densidade e vigor da vegetação (Rouse *et al*., 1974; Gao, 1996; Pettoreli *et a*l., 2005). Esses índices são amplamente utilizados em estudos de conservação, planejamento ambiental e avaliação de impactos, devido à sua capacidade de traduzir variações biofísicas da vegetação em escalas regionais e globais (Tran, Reef e Zhu, 2022; Badapalli,Nakkala e Kottala, 2024).

Estudos recentes têm demonstrado a relevância desses índices na detecção de mudanças ecológicas, degradação ambiental e na avaliação da efetividade de políticas de conservação. Por exemplo, Cidreira-Neto *et al*. (2024) realizaram uma análise espaço-temporal da vegetação de manguezais na RESEX Acaú-Goiana utilizando NDVI, NDWI e MMRI, identificando impactos relacionados à carcinicultura e ao uso industrial em áreas protegidas. De maneira semelhante, Li et al. (2024) evidenciaram o papel fundamental das áreas verdes urbanas na mitigação das ilhas de calor, demonstrando, por meio de análises baseadas em NDVI e dados de sensoriamento remoto, que cidades do hemisfério Sul apresentam menor capacidade de resfriamento em comparação às do hemisfério Norte, em função de desigualdades na quantidade e qualidade da cobertura vegetal.

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar os índices espectrais de vegetação em cinco das maiores Unidades de Conservação localizadas na mesorregião Norte Central do Paraná. A proposta é avaliar a cobertura vegetal ao longo do período de 2005 a 2025, identificando tendências, possíveis processos de degradação ou regeneração. Para isso, foram utilizadas imagens obtidas pelos sensores do satélite Landsat, que oferecem uma série histórica extensa e resoluções espacial e espectral adequadas para estudos ambientais em escala regional.

Materiais e Métodos

Área de Estudo

O estudo foi conduzido nas cinco maiores Unidades de Conservação localizadas na mesoregião Norte Central do estado do Paraná As camadas vetoriais com os limites das mesorregiões e das unidades de conservação foram obtidas no portal Paraná Interativo , o que possibilitou a obtenção exata das áreas de interesse para efetuar o recorte espacial e a análise espectral. A figura 01 apresenta o mapa de localização da área de estudo.

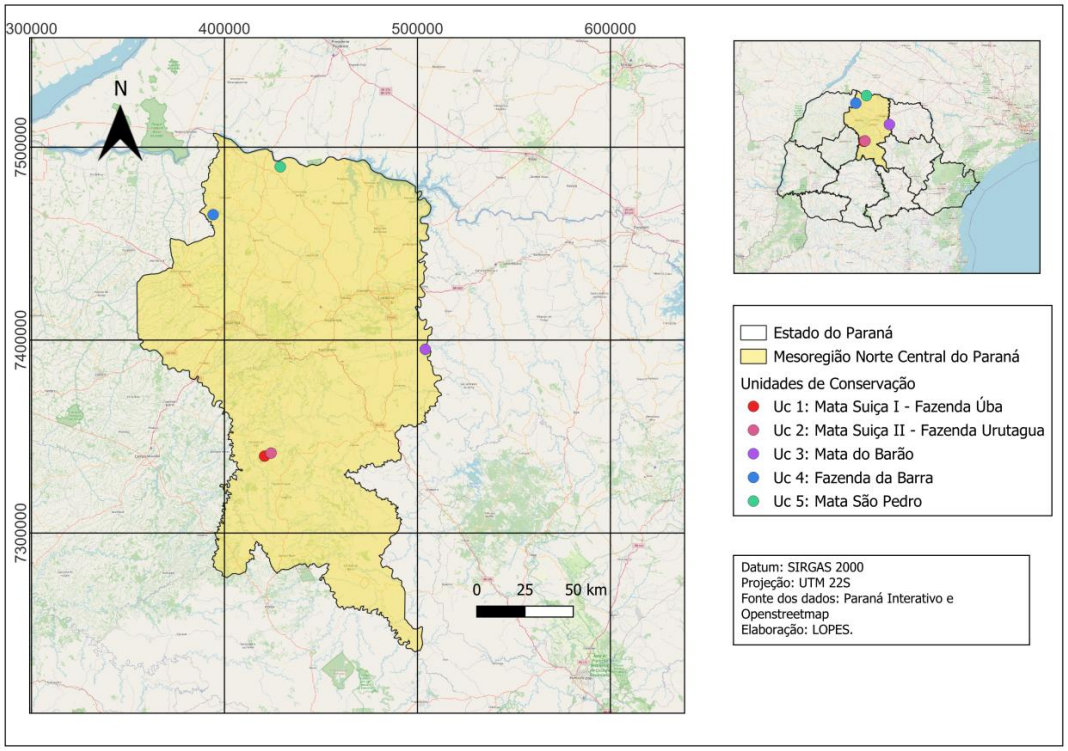


Figura 01: Mapa de localização da área de estudo.
Fonte: Autoria Própria (2026)

Dados de Sensoriamento Remoto

Foram utilizadas três imagens de sensores da série Landsat para cada ano (órbitas/pontos: 223/76, 222/76 e 222/77) :

- Landsat 5 TM: cenas referente ao ano de 2005;
- Landsat 8 OLI: cenas dos anos de 2015 e 2025.

O Quadro 01 apresenta as bandas utilizadas de cada satélite e seus respectivos comprimentos de onda (NASA, 2026).

Uso / Função	Banda Landsat 8 (OLI)	Banda Landsat 5 (TM)	Comprimento de Onda (nm)
SWIR1 (Infravermelho médio)	Banda 6	Banda 5	1,57 – 1,65 / 1,55 – 1,75
NIR (Infravermelho próximo)	Banda 5	Banda 4	0,85 – 0,88 / 0,76 – 0,90
RED (vermelho)	Banda 4	Banda 3	0,64 – 0,67 / 0,63 – 0,69

Quadro 01: Bandas utilizadas e seus comprimentos de onda em nanômetros.
Fonte: Autoria Própria (2025)

As imagens foram obtidas por meio do portal EarthExplorer (USGS, 2026) e escolhidas de modo a manter a sazonalidade constante, todas adquiridas entre os meses de junho a agosto, visando minimizar as variações de iluminação solar e o efeito de sazonalidade na vegetação. As imagens foram baixadas em nível de produto com reflectância de superfície, adequadas para análises comparativas multitemporais.

Pré-processamento e Processamento de Imagens

O pré-processamento e o cálculo dos índices foram realizados com o software QGIS por meio do plugin Semi-Automatic Classification Plugin (SCP). As principais etapas foram:

- Seleção e download das imagens
- Importação das bandas espectrais;
- Reprojeção das bandas para o sistema de coordenadas UTM 22 Sul;

- Aplicação da operação de mosaico, para garantir a cobertura completa das Unidades de Conservação que ultrapassavam os limites de uma única cena;
- Aplicação de composição em falsa-cor para visualização da vegetação (usando combinações como: R5G4B3 para Landsat 5 e R6G5B4 para Landsat 8)
- Cálculo do NDVI para cada ano, conforme a Equação (01):

(01)

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Onde: NIR corresponde à banda do Infravermelho Próximo e RED à faixa do Vermelho.

Após a geração dos índices para os três anos, foi aplicada uma padronização da faixa de valores na visualização. O valores mínimos e máximos do NDVI foram identificados considerando o conjunto dos três anos, e essa faixa foi aplicada uniformemente para todas as composições. Esse procedimento garantiu a comparação visual entre os anos analisados e a partir disso foi feita a geração de mapas temáticos de NDVI para cada área e ano.

Descrição das Unidades de Conservação

As informações das Unidades de Conservação, como nome, ano de criação, foram obtidas diretamente da própria camada vetorial de polígonos das UCs. Todas referem-se à categoria Reserva Particular do Patrimônio Natural, a qual, segundo a Lei nº 9.985 /2000, é definida como uma unidade de conservação de domínio privado, criada voluntariamente pelo proprietário com a finalidade de conservar a diversidade biológica, permitindo apenas o uso indireto dos recursos naturais (BRASIL, 2000). A tabela 01 apresenta apresenta as informações de área e ano de criação das áreas analisadas neste trabalho.

Identificador	Nome da UC	Ano de criação	Área (ha)
UC1	Mata Suiça I - Fazenda Úba	1998	676,53
UC2	Mata Suiça II - Fazenda Urutagua	1998	631,55
UC3	Mata do Barão	1998	877,25
UC4	Fazenda da Barra	1998	614,74
UC5	Mata São Pedro	1999	428,16

Tabela 01: Descrição das Unidades de Conservação estudadas.
Fonte: Autoria Própria (2025)

Análise Espacial e Temporal

Para a análise temporal do NDVI nas UCs selecionadas, inicialmente os valores dos pixels das imagens de satélite foram convertidos em pontos no QGIS, de modo a permitir a extração individualizada das informações de cada célula raster. Em seguida, esses pontos foram transformados em tabelas contendo os valores de NDVI correspondentes aos anos de 2005, 2015 e 2025, organizados separadamente para cada UC.

As tabelas geradas foram então exportadas e processadas no software R, onde foi realizada a construção dos gráficos do tipo boxplot. Essa representação gráfica foi escolhida por permitir a visualização da distribuição dos valores de NDVI ao longo do tempo, evidenciando tendências, variações e possíveis outliers em cada UC analisada.

Dados de precipitação média acumulada (em mm) no período de janeiro a julho para os três anos analisados foram obtidos pela plataforma Google Earth Engine, por meio da qual foram obtidos dados do Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data (CHIRPS). Trata-se de um produto híbrido que integra climatologia interna, dados de satélite com resolução espacial de 5 km e informações de estações in situ, permitindo gerar séries temporais de precipitação em grade, úteis para análises de tendência e monitoramento de secas sazonais.

Resultados e Discussões

Foi aplicada a composição falsa-cor nas áreas analisadas para a melhor visualização da paisagem. Nessa configuração, os tons arroxeados representam o solo exposto, enquanto os tons esverdeados correspondem à vegetação, sendo densa quando a textura apresenta-se rugosa e associada à cultivo agrícola quando a textura é lisa. Observa-se, na Figura 02, a presença de um fragmento de solo exposto no item (a), localizado dentro da UC1 - Mata Suiça I - Fazenda Úba. Esse fragmento foi investigado por meio do Brazilian Data Cube, uma plataforma do INPE que disponibiliza informações sobre o uso do solo (Ferreira *et al.,* 2020*).* Verificou-se que se trata de uma área destinada ao cultivo de soja de acordo com a classificação do uso do solo do MapBiomas (vide Figura 03). O fato de esse fragmento ter sido identificado como solo exposto em 2005 pode indicar que a imagem foi obtida em período de colheita, o que indica atividade agrícola não permitida na área.

Adicionalmente, é possível identificar uma melhora na cobertura vegetal ao longo do tempo, especialmente nos itens (m), (n) e (o), que correspondem a UC5. Fora essa variação, não foram constatadas diferenças significativas nas UCs entre os anos analisados.

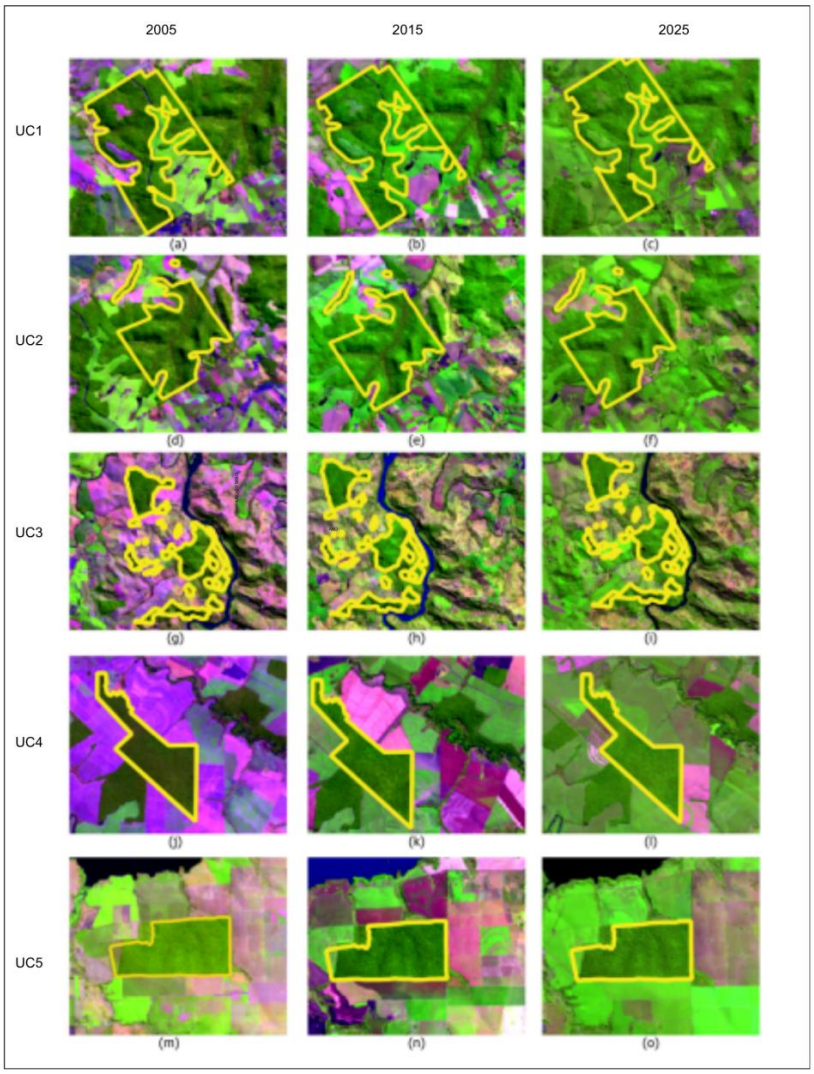


Figura 02: Composição falsa cor das Unidades de Conservação: (a) UC1, 2005; (b) UC1, 2015; (c) UC1, 2025; (d) UC2,2005; (e) UC2, 2015; (f) UC2, 2025; (g) UC3, 2005; (h) UC3, 2015; (i) UC3, 2025; (j) UC4, 2005; (k) UC4, 2015; (l) UC4, 2025; (m) UC5, 2005; (n) UC5, 2015; (o) UC5, 2025.
Fonte: Autoria Própria (2025)



Figura 03: Caracterização do uso e cobertura do solo (eixo vertical) por ano do fragmento sem vegetação, segundo MapBiomas e IBGE.
Fonte: Adaptado de Brazil Data Cube (2025)

Análise Espacial do NDVI

Na Figura 04, observa-se uma melhoria da cobertura vegetal ao longo dos anos em todas as unidades de conservação. Essa tendência é especialmente evidente na UC4 (Figura 04 (j), (k) e (l)), na faixa de 0,16 a 0,46. Considerando que o NDVI é

um índice que varia de -1 a 1, valores mais próximos de -1 estão associados à vegetação degradada ou à ausência de cobertura vegetal, como areia, neve ou solo exposto, enquanto valores próximos de 1 indicam vegetação densa e saudável (NASA, 2026). No caso da Figura 04 (l), observa-se coloração mais próxima do verde escuro, indicando valores mais elevados de NDVI (próximos de 0,46) em comparação às Figuras 04 (j) e (k). Dessa forma, infere-se que houve melhoria da vegetação ao longo do período analisado em todas as UCs evidenciada pela tendência de aumento dos valores de NDVI ao longo do tempo, representada pela intensificação da coloração verde.

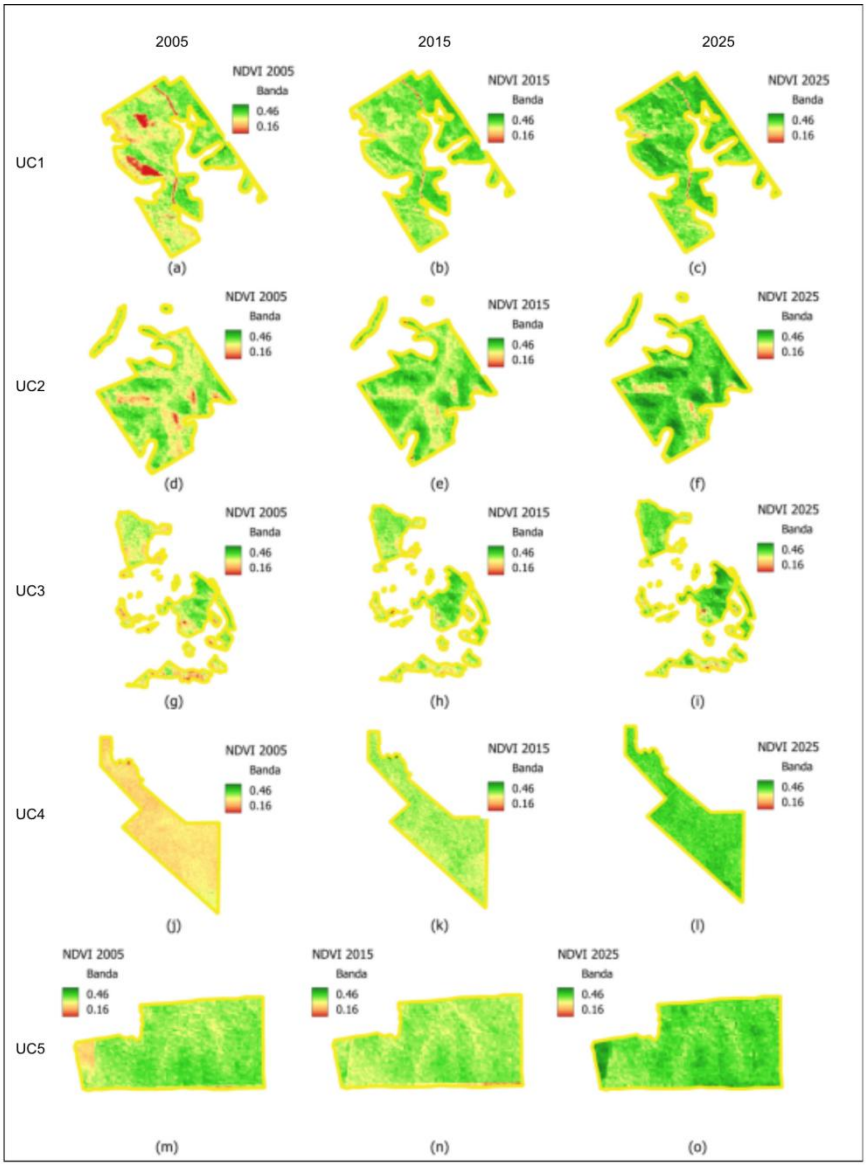


Figura 04: Mapas de NDVI das Unidades de Conservação ao longo do tempo: (a) UC1, 2005; (b) UC1, 2015; (c) UC1, 2025; (d) UC2,2005; (e) UC2, 2015; (f) UC2, 2025; (g) UC3, 2005; (h) UC3, 2015; (i) UC3, 2025; (j) UC4, 2005; (k) UC4, 2015; (l) UC4, 2025; (m) UC5, 2005; (n) UC5, 2015; (o) UC5, 2025.
Fonte: Autoria Própria (2025)

Análise Gráfica do NDVI

A Figura 05 apresenta os boxplots dos valores de NDVI para cada UC ao longo dos anos. Conforme indicado previamente pelos mapas de NDVI da Figura 04, observa-se um aumento consistente desse índice em todas as unidades analisadas. A única exceção ocorre na UC5, que apresentou um valor ligeiramente menor em 2015 em comparação a 2005. Ainda assim, assim como nas demais UCs, o maior valor registrado ocorre em 2025, evidenciando a tendência geral de aumento de densidade da vegetação ao longo do período avaliado. Em função disso, foram coletados dados de precipitação para os mesmos períodos a fim de verificar se este aumento na cobertura vegetal poderia estar associado a variações nos índices de precipitação.

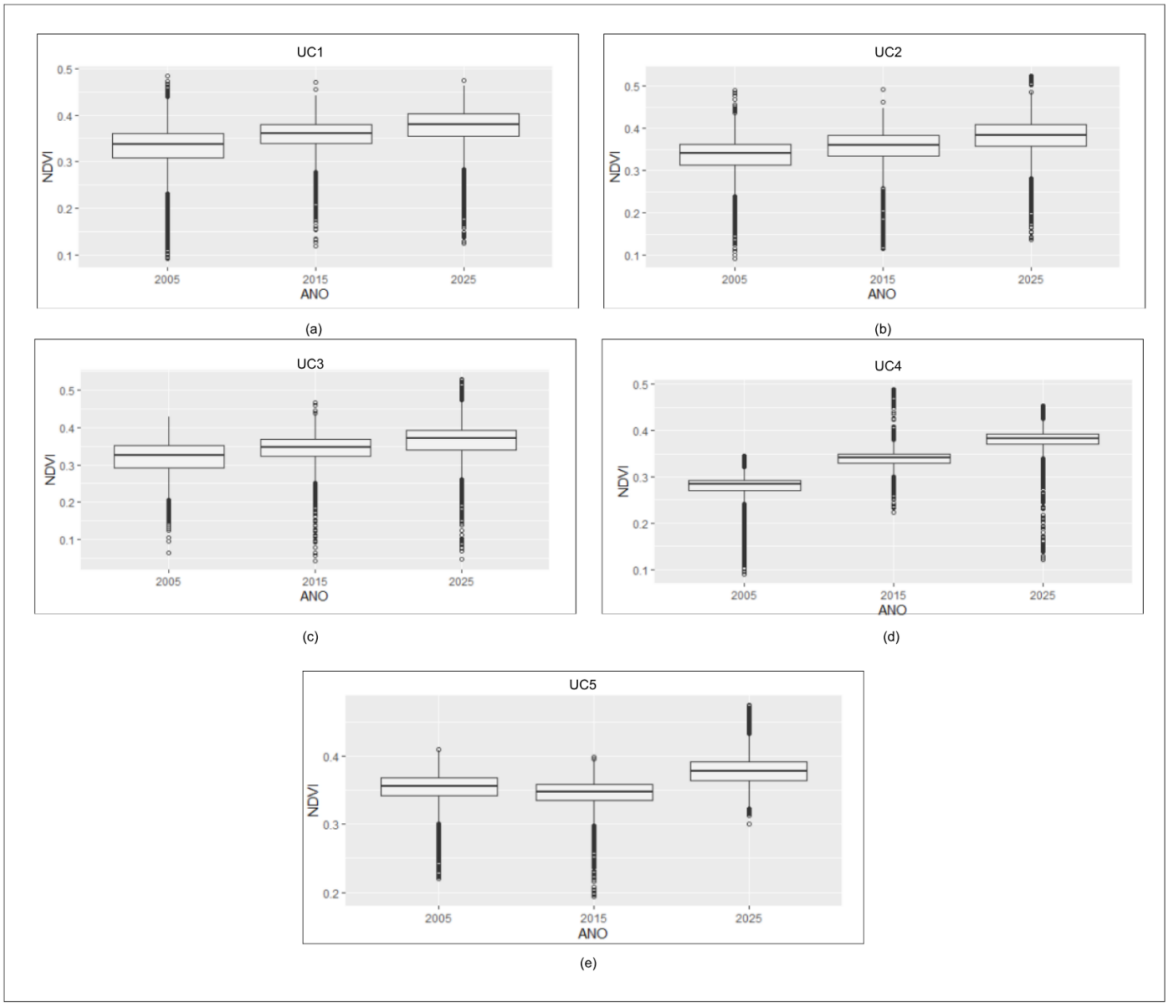


Figura 05: Gráficos Boxplot dos valores de NDVI para cada UC para os anos de 2005, 2015 e 2025: (a) UC1; (b) UC2; (c) UC3; (d) UC4; (e) UC5.
Fonte: Autoria Própria (2025)

Avaliação da precipitação

Foram elaborados mapas da precipitação média acumulada (em mm) no período de janeiro a julho para os três anos analisados (Figura 06).

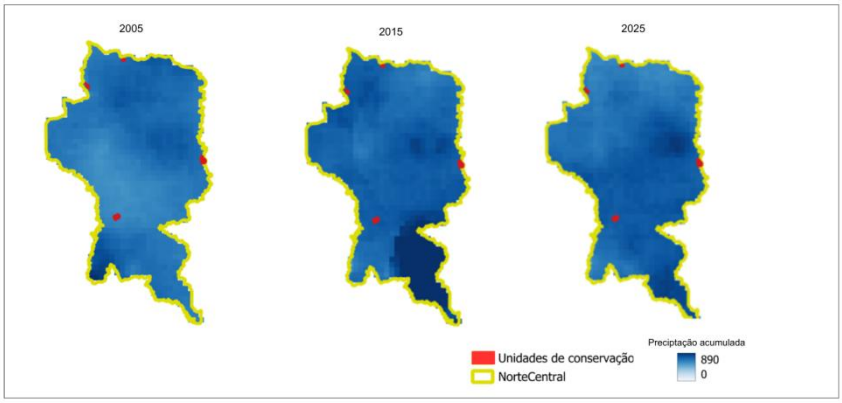


Figura 6: Mapas de precipitação média acumulada de janeiro a julho em mm da área de estudo ao longo do tempo.
Fonte: Autoria Própria (2025)

A análise visual da precipitação média dentro dos limites das UCs (assinaladas em vermelho) não revelou diferenças significativas que permitam considerá-la um fator determinante para o aumento observado na vegetação, contrariando a hipótese

inicial. Esse resultado indica que o aumento da cobertura vegetal não está associado a mudanças no regime pluviométrico, mas sim à efetividade das políticas de conservação implementadas nas Unidades.

Considerações Finais

Concluiu-se neste estudo que houve um incremento de cobertura vegetal nas UCs analisadas, entre 2005 e 2025, o que é um indicativo de que a manutenção de seus limites como área de proteção integral mantém-se efetiva. Dessa forma, reforça-se a importância de medidas de proteção contínuas e bem planejadas para a conservação da vegetação nativa. O sensoriamento remoto mostra-se como uma ferramenta robusta e eficiente para avaliar a preservação de áreas protegidas, identificar tendências ambientais e monitorar o cumprimento da legislação, contribuindo para uma gestão ambiental mais precisa e baseada em evidências.

Agradecimentos

Os Autores agradecem a Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Londrina pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

BADAPALLI, P., NAKKALA, A., GUGULOTHU, S., & KOTTALA, R. (2024). Dynamic Land Degradation Assessment: Integrating Machine Learning with Landsat 8 OLI/TIRS for Enhanced Spectral, Terrain, and Land Cover Indices. Earth Systems and Environment. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s41748-024-00442-9.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 jul. 2000.

CIDREIRA-NETO, I. R. G. et al.. Spatiotemporal analysis of mangrove vegetation in a protected area using spectral indices. Ocean and Coastal Research, v. 72, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1590/2675-2824072.23171.

FERREIRA et al. Earth Observation Data Cubes for Brazil: Requirements, Methodology and Products Remote Sensing, v. 12, n. 24, p. 4033, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/rs12244033

FONSECA, C. R.; VENTICINQUE, E. M. Biodiversity conservation gaps in Brazil: A role for systematic conservation planning. Perspectives in Ecology and Conservation, [S. l.], v. 16, n. 2, p. 61-67, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.03.001.

GAO, B.(1996) NDWI—A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. Remote Sensing of Environment, 58(3), 257–266. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Banco de Dados Científicos (BDC). Disponível em: https://data.inpe.br/bdc/. Acesso em: 25 jun. 2025.

JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

LI, Y.; SVENNING, J.-C.; ZHOU, W.; ZHU, K.; ABRAMS, J. F.; LENTON, T. M.; TENG, S. N.; DUNN, R. R.; XU, C. Green spaces provide substantial but unequal urban cooling globally. Nature Communications, v. 15, artigo 51355, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41467-024-51355-0

LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍZIO, E. et al. Change Detection Techniques. International Journal of Remote Sensing, v. 25, p. 2365-2401, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1080/0143116031000139863

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA. Landsat Science. Goddard Space Flight Center. Disponível em: https://landsat.gsfc.nasa.gov/. Acesso em: 25 jun. 2025.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Disponível em: https://www.earthdata.nasa.gov/topics/land-surface/normalized-difference-vegetation-index-ndvi#:~:text=NASA%E2%80%99s%20Earth%20satellites%20collect%20NDVI%20data%20to%20measure,to%20remotely%20examine%20vegetation%20over%20a%20given%20area.. Acesso em: 25 mar. 2026.

PARANÁ INTERATIVO. Portal Paraná Interativo. Curitiba, PR. Disponível em: https://www.paranainterativo.pr.gov.br/. Acesso em: 25 jun. 2025.

PETTORELI, N.; Vik, J. O.; MYSTERUD, A.; GAILLARD, J.-M.; TUCKER, C. J.; Stenseth, N. C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. Trends in Ecology & Evolution, 20(9), 503–510. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011

ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A. & DEERING, D.W. (1973) Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite). Proceedings of 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium, Greenbelt, 10-14 December, SP-351, 309-317. Disponível em: https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614

RYLANDS, A. B. & BRANDON, K. (2005). Brazilian Protected Areas. Conservation Biology, 19(3), 612–618. Disponível em: https://doi.org/10.1111%2Fj.1523-1739.2005.00711.x

SOARES-FILHO, B. S. et al. (2010). Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. PNAS. Disponível em: https://doi.org/10.1073/pnas.0913048107

TRAN, T. V.; REEF, R.; ZHU, X. A review of spectral indices for mangrove remote sensing. Remote Sensing, v. 14, n. 19, p. 4868, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/rs14194868

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. EarthExplorer. Disponível em: https://earthexplorer.usgs.gov/. Acesso em: 25 jun. 2025.

INDICADORES AMBIENTAIS PARA O BAIXO SÃO FRANCISCO COM USO DE GEOTECNOLOGIAS

1 Thiago Luiz dos Santos, 2 Inajá Francisco de Sousa, 3 Antônio Heriberto de Castro Teixeira, 4 Janice Freitas Leivas, 5 Celina Maki Takemura

1 Universidade Federal de Sergipe, e-mail: tthiagolluiz@hotmail.com; 2 Universidade Federal de Sergipe, e-mail: inajafrancisco@academico.ufs.br; 3 Universidade Federal de Sergipe, e-mail: heribertoteixeira11@gmail.com; 4 Embrapa Territorial, e-mail: janice.leivas@embrapa.br; 5 Embrapa Territorial, e-mail: celina.takemura@embrapa.br

Palavras-chave: Evapotranspiração; Produção de Biomassa; Recursos Naturais.

Resumo

O algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) e o modelo RUE (*Radiation Use Efficiency*) foram integrados com grades de dados climáticos do ano de 2024 e produtos MODIS de reflectância, para análises dos indicadores ambientais evapotranspiração atual (ET) e produção de biomassa (BIO) nas distintas condições ambientais do bacia do Baixo São Francisco. Variações espaciais e temporais da ET e da BIO nas áreas da bacia limitadas pelos estados de Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA) foram detectadas com respectivas médias anuais da ET de 595 ± 207 mm ano^{-1}, 508 ± 147 mm ano^{-1}, 493 ± 173 mm ano^{-1} e 553 ± 182 mm ano^{-1} e da BIO de 23 ± 11 t ha^{-1} ano^{-1}, 20 ± 8 t ha^{-1} ano^{-1}, 21 ± 10 t ha^{-1} ano^{-1}, 20 ± 8 t ha^{-1} ano^{-1}. Com relação às dinâmicas ao longo do ano as maiores taxas da ET, acima de 3,50 mm dia^{-1} ocorreram de julho a agosto para as áreas em PE, SE e AL, enquanto estes ocorreram durante março para BA. Os maiores valores da BIO foram após o período chuvoso nessas regiões, acima de 190 kg ha^{-1} d^{-1} em julho, nas áreas limitadas por PE, AL e SE, enquanto para aquelas na BA o pico foi em torno de 156 kg ha^{-1} d^{-1}, mas de abril a maio. As modelagens apresentaram aplicabilidade para monitoramento das condições hídricas e de vegetação ao longo do ano nas escalas temporais de 16 dias e espacial de 250 m das imagens, com potencial para subsídio às políticas públicas com relação ao manejo sustentável dos recursos naturais e possibilidade de replicagem dos métodos em outras condições ambientais.

Introdução

Alterações nos sistemas climáticos vêm ocorrendo em várias regiões do mundo, as quais têm sido atribuídas às atividades humanas. Em adição, o rápido crescimento da agricultura pode causar grandes mudanças no uso da terra, nos cursos de água e nos lençóis freáticos. A demanda hídrica vem excedendo o suprimento de água em muitas regiões do mundo, e como a população cresce continuadamente, espera-se que o problema se agrave. Considerando-se estes cenários, as explorações dos recursos naturais nas bacias hidrográficas não devem ser consideradas apenas em escalas locais. Esse é o caso de algumas áreas da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, principalmente nas condições semiáridas, afetando os ecossistemas aquáticos e terrestres bem como intensificando a competição pelos recursos hídricos (TEIXEIRA et al., 2024).

As quantificações em larga escala da evapotranspiração atual (ET) e da produção de biomassa (BIO) precisam ser consideradas na exploração dos recursos naturais de uma forma sustentável para garantia da disponibilidade desses recursos ao longo do tempo. O uso inadequado destes recursos impacta as características físicas, químicas e biológicas da água (GUNKEL et al., 2007), afetando também os balanços de energia, de água, e de carbono (FOLEY et al., 2005; TEIXEIRA et al., 2024). As análises desses indicadores ambientais em larga escala são importantes para este reconhecimento, principalmente quando se visa a redução da quantidade de água adicional na agricultura, proporcionando uma maior disponibilidade hídrica para manutenção dos agroecossistemas, sendo crucial para a restauração ecológica e acesso aos impactos das mudanças climáticas e de uso da terra (YANG et al., 2016; ZHANG et al., 2019).

A zona costal da bacia do Rio São Francisco é de grande importância hidrológica no Brasil, entretanto, intervenções nas quais o rio e seus tributários têm passado geram alterações no seu fluxo para o oceano, com repercussões no Baixo São Francisco, com avanço de frentes salinas, afetando as taxas da ET e da BIO dos seus agroecossistemas e ecossistemas aquáticos. Em adição, a transposição das águas do rio, as mudanças climáticas e de uso da terra na bacia aumentam os conflitos entre os usuários da água, demandando pesquisas que visem a redução dos impactos ambientais negativos, sendo a agricultura atualmente uma das suas principais atividades econômicas causadoras de mudanças de uso da terra.

Além da rápida expansão da agricultura na bacia do Baixo São Francisco aumentar os conflitos entre os diferentes usuários da água, eventos de escassez hídrica impactam a assimilação de carbono pela mudança na composição das espécies nos diferentes biomas (TEIXEIRA et al., 2024; ZHAO e RUNNING, 2010). A ET é criticamente importante devido a sua relação com a BIO para todos os agroecossistemas dos biomas Caatinga e Floresta Atlântica dentro da bacia. Entretanto, o aumento das taxas evapotranspiratórias resulta em menor disponibilidade de água para usos humanos e ecológicos.

Medições de campo da ET e da BIO falham na extrapolação dos resultados em larga escala. Essa dificuldade destaca o uso de sensoriamento remoto por satélites em conjunto com dados climáticos (TEIXEIRA et al, 2024). Em ambientes com limitação de água, particularmente nas áreas semiáridas do bioma Caatinga no Baixo São Francisco, o desafio na agricultura é o aumento da BIO através de optimização de práticas de manejo (ZHANG et al., 2019).

Considerando a operacionalidade, o algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*), elaborado por Teixeira (2010), foi usado para obtenção da ET, já validado em diferentes condições ambientais da bacia do Rio São

Francisco (TEIXEIRA et al. 2024) e para quantificação da BIO, o modelo da RUE (*Radiation Use Efficiency*), proposto por MONTEITH (1977), foi aplicado com o SAFER em conjunto com grades de dados climáticos, possibilitando análises das dinâmicas desses indicadores ambientais ao longo do ano de 2024.

Embora a modelagem tenha sido testada para apenas um ano, séries históricas de dados podem ser usadas para detecção de anomalias para períodos específicos de qualquer ano. O sucesso das aplicações atuais podem encorajar replicações dos métodos em outras condições ambientais com simples calibrações das equações da modelagem.

Material e Métodos

Área de estudo

A Figura 01 apresenta a localização da bacia do Baixo São Francisco no Nordeste do Brasil com destaques para as estações climáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e delimitações das áreas da bacia nos estados de Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA).

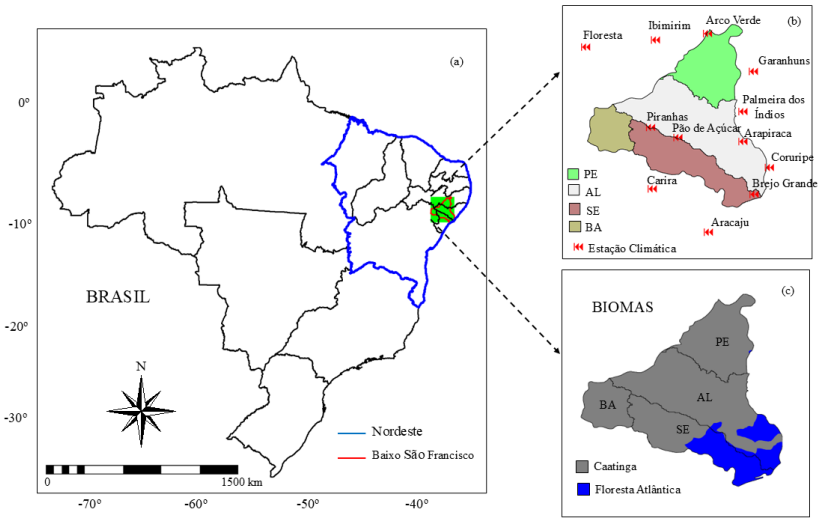


Figura 01: Localização da bacia Baixo São Francisco na Região Nordeste do Brasil (a); estações climáticas utilizadas envolvendo as áreas dos estados de Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA) dentro da bacia (b); e biomas dentro da bacia (c).

O Baixo São Francisco é um sistema complexo envolvendo quatro estados brasileiros com um tamanho de 19.987 km^2 e altitudes de 0 a 480 m. O tipo de clima predominante é subúmido, com total anual médio de precipitação (P) de 957 mm ano^{-1} e evapotranspiração de referência (ET_0) de 1.500 mm ano^{-1}. Os valores médios de temperatura do ar (T_a) é de 25 ºC. Os tipos de biomas são Caatinga e Floresta Atlântica, sendo que nos estados de Pernambuco (PE) e Bahia (BA) só tem áreas dentro da Caatinga enquanto Alagoas (AL) e Sergipe apresentam partes dos agroecossistemas na Caatinga, na Floresta Atlântica e em transição desses dois biomas. O bioma Caatinga passa por eventos de seca frequentes e as espécies naturais desenvolvem resiliência com o aumento da aridez nessas condições (SANTOS et al., 2014). O bioma Floresta Atlântica apresenta clima tropical úmido, entretanto com microclimas contrastantes entre vegetação natural e áreas antropizadas (RIBEIRO et al. 2009).

Modelagem dos indicadores ambientais

Os dados climáticos que foram interpolados pelo método krigagem ordinária na modelagem dos indicadores ambientais em larga escala para o ano de 2024, foram os valores diários da radiação solar global (R_G); da temperatura do ar (T_a), da umidade relativa média do ar (UR); e da velocidade do vento (u). Estes dados foram usados no cálculo da evapotranspiração de referência (ET_0) pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) e na modelagem da ET e da BIO em conjunto com parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, em conjunto com os valores de reflectância das bandas 1 e 2 do produto MOD13Q1, na resolução espacial de 250 m e resolução temporal de 16 dias na obtenção dos indicadores ambientais (TEIXEIRA et al., 2024).

As equações da modelagem estão descritas em detalhes em Teixeira (2010) e Teixeira et al. (2024), sendo aqui portanto resumidas aqui apenas as equações principais.

Com a utilização do SAFER, os valores diários da razão $ET_r = ET/ET_0$ foram modelados:

$$ET_r = exp\left[a_{sf} + b_{sf} \left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \left(\frac{ET_{0\_ano}}{5} \right) \quad (1)$$

onde a_{sf} e b_{sf} são os coeficientes de regressão, T_0 é a temperatura da superfície, α_0 é o albedo da superfície, NDVI é o índice da diferença de vegetação normalizado e ET_{0_ano} é a evapotranspiração média diária na escala anual sendo 5 mm dia^{-1} o valor para a região de origem e período de elaboração do modelo no Submédio São Francisco (Teixeira, 2010), inserido para calibração

sob diferentes demandas atmosféricas. A inclusão da razão ($ET0_{\_ano}/5$) é para calibração considerando as diferentes demandas atmosféricas com relação às condições de elaboração do modelo original.

Através de funções condicionais aplicadas aos valores de NDVI, os valores diários de ET são obtidos:

$$ET = ET_r ET_0 \; ou \; ET_{eq} \quad (2)$$

onde ET_{eq} é a evapotranspiração de equilíbrio obtida desprezando-se as resistências da superfície (r_s) e aerodinâmica (r_a) na equação de Penman-Monteith (RAUPASCH, 2001).

Na estimativa da BIO, o modelo da eficiência do uso da radiação (MONTEITH, 1977) será aplicado introduzindo o efeito da umidade na zona das raízes através de ET_r:

$$BIO = \varepsilon_{max} ET_r RAF_{abs} 0.864 \quad (3)$$

onde ε_{max} é eficiência máxima de uso da luz, considerada como 2,45 g MJ^{-1} devido a maioria das espécies são C3 no Baixo São Francisco, 0,864 é um fator de conversão e RAF_{abs} é a radiação fotossinteticamente absorvida.

Resultados e Discussão

Condições Climáticas

A Figura 02 apresenta os valores na escala de 16 dias das imagens MODIS dos totais médios dos pixels para precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET_0); e médias diários para a radiação solar global (R_G) e temperatura do ar (T_a), nas áreas do Baixo São Francisco dentro dos estados de Pernambuco(PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA), durante o ano de 2024, em termos de dia juliano (DJ).

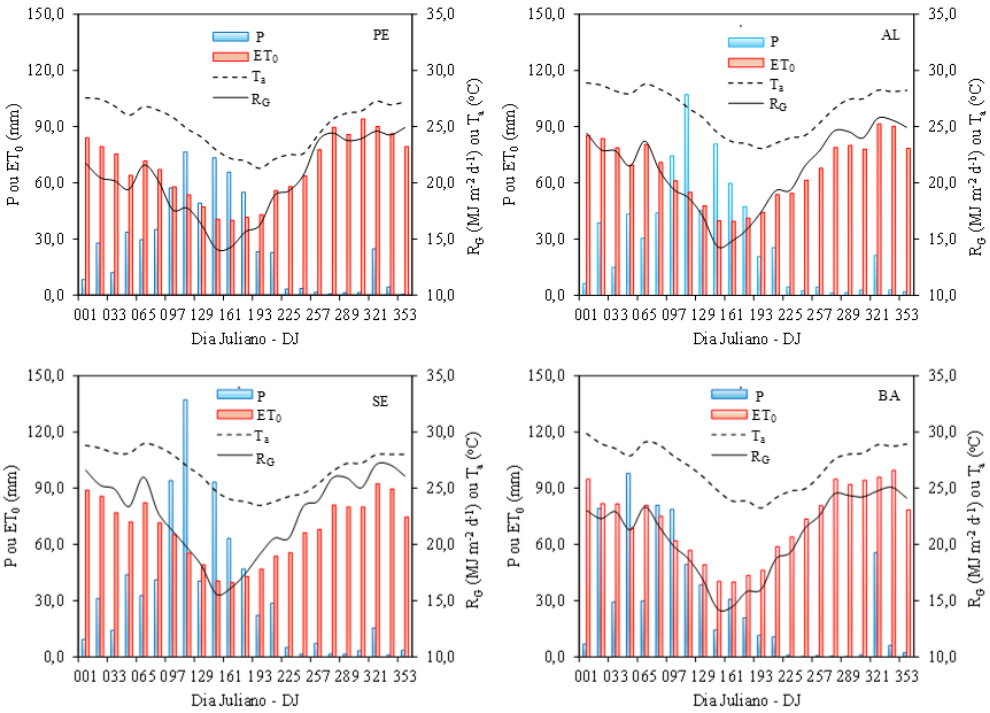


Figura 02: Valores na escala de 16 dias das imagens MODIS, para os totais de precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET_0); e médias diárias de radiação solar global (R_G) e temperatura do ar (T_a) nas áreas dos estados de Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE e Bahia (BA) dentro do Baixo São Francisco, em termos de dia juliano (DJ), durante o ano de 2024.

Os valores mais altos de P, na escala de 16 dias das imagens MODIS, ocorreram no intervalo de DJ 113-128 (abril-maio) para SE (137 mm), AL (107 mm) e PE (76 mm). Diferentemente para BA os limites superiores de P ocorreram de DJ 049 a 064 (fevereiro-março), quando foi contabilizado um total de 98 mm nessa escala de tempo. Em geral as chuvas proporcionaram boas condições de umidade na zona das raízes no meio do ano, com menores quantidades no segundo semestre.

Considerando a demanda atmosférica, os valores da ET_0 foram mais elevados que aqueles para P na maior parte do ano, também com diferentes magnitudes entre as áreas da bacia nos estados de PE, AL, SE e BA, com os respectivos picos de 94, 91,

92 e 100 mm ano^{-1}, ocorrendo no período de DJ 305 a 354 (novembro a dezembro).

De acordo com a contabilidade desses componentes do balanço hídrico climático, P representou 39% da ET_0 para as áreas dentro dos estados de PE e BA enquanto para AL e SE esses percentuais foram de 44 e 47%, respectivamente, indicando um déficit hídrico climático geral na maior parte do ano, com maior atendimento das chuvas às demandas atmosféricas em SE, durante o ano de 2024 no Baixo São Franciscos

Os valores de R_G e T_a apresentaram tendências similares à da ET_0 ao longo de 2024, entretanto os valores mais altos para R_G ocorreram no final do ano, de novembro a dezembro (DJ 321-366), com pico de 27,0 MJ m^{-2} d^{-1} em SE, envolvendo o período de culminação do Sol na região fora da estação chuvosa, enquanto para T_a os maiores valores foram no início do ano de DJ 001 a 064 (janeiro-março), acima de 28,0 ºC, evidenciando o atraso entre o aquecimento do solo e do ar, considerando a continuidade ano a ano. As áreas do Baixo São Francisco de maior incidência de radiação solar foram em SE, com média anual de 22,7 MJ m^{-2} d^{-1}, enquanto as mais quentes foram na BA, com média anual de 27,0 ºC.

Evapotranspiração atual e produção de biomassa

A Figura 03 mostra as distribuições espaciais, médias e desvios padrões para os totais anuais da evapotranspiração atual (ET) e produção de biomassa (BIO), nas áreas do Baixo São Francisco limitadas pelos estados de Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA), em 2024 .

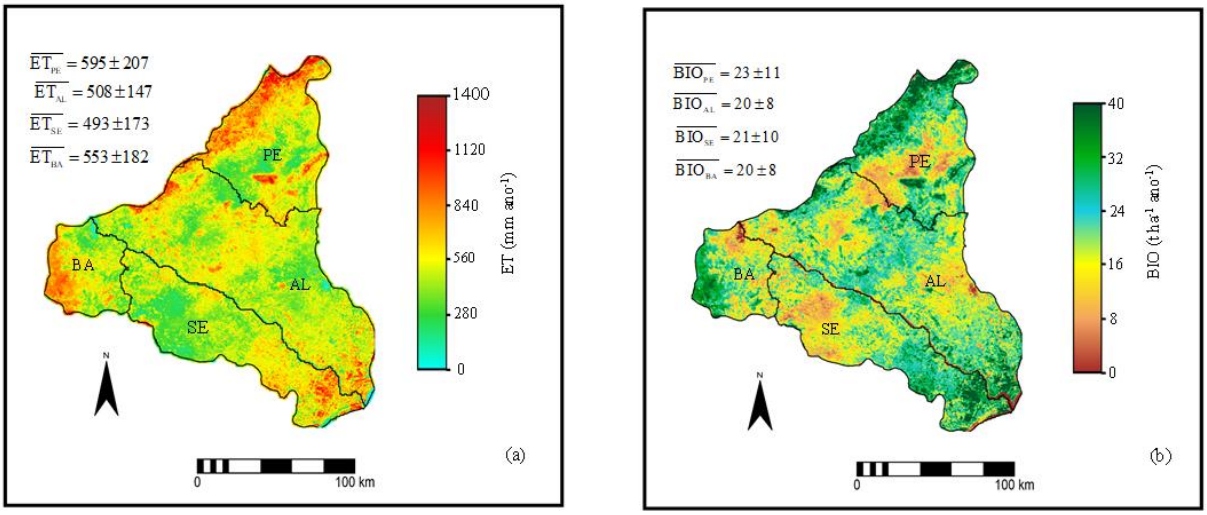


Figura 03: Distribuições espaciais, médias e desvios padrões dos totais anuais da Evapotranspiração atual (ET) e produção de biomassa (BIO) nas áreas da bacia do Baixo São Francisco limitadas pelos estados de Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA).

De acordo com a Figura 03a, as maiores taxas da ET, acima de 1000 mm ano^{-1}, aconteceram mais na porção oeste dentro de BA e na porção leste de AL e SE, enquanto as menores, abaixo de 500 mm ano^{-1}, concentraram-se na parte central de PE e SE. Com relação a BIO (Figura 03b), os maiores valores, acima de 30 t ha^{-1} ano^{-1} foram mais frequentes na parte oeste de PE e BA e leste de AL e SE, e as menores, abaixo de 10 t ha^{-1} ano^{-1} aconteceram mais na parte central de toda a bacia. Os picos da ET e da BIO estão também relacionados com as mudanças de uso da terra, ou seja, a substituição das espécies dos ecossistemas naturais por culturas irrigadas no bioma Floresta Atlântica nas margens do Rio São Francisco . Por outro lado, os valores mais elevados desses indicadores ambientais no lado oeste dos estados PE e BA indicam boas condições de umidade na zona das raízes das plantas, apropriadas para agricultura de sequeiro no bioma Caatinga.

As áreas do Baixo São Francisco que mais consumiram água foram aquelas em PE, contendo só agroecossistemas da Caatinga, com ET anual média de 595 mm ano^{-1} e as que consumiram menos foram aquelas em SE, com taxa anual de 493 mm ano^{-1}, com a maior de Caatinga, mas também com agroecossistemas na Floresta Atlântica do lado leste do Estado.

Com relação as variações espaciais, as maiores na ET ocorreram nos estados de PE e SE, com os desvios padrões representando 35% dos valores médios dos pixels. As menores foram para AL, com este percentual de 29%. Considerando a BIO, as maiores variações espaciais ocorreram também em PE e SE coma os desvios padrões representando 48% dos valores das médias dos pixels, mas com este percentual de 40% para AL e SE.

A Figura 04 apresenta a dinâmica dos valores médios diários da ET na escala de 16 dias das imagens MODIS, para as áreas do Baixo São Francisco dentro dos estados PE, AL, SE e BA.

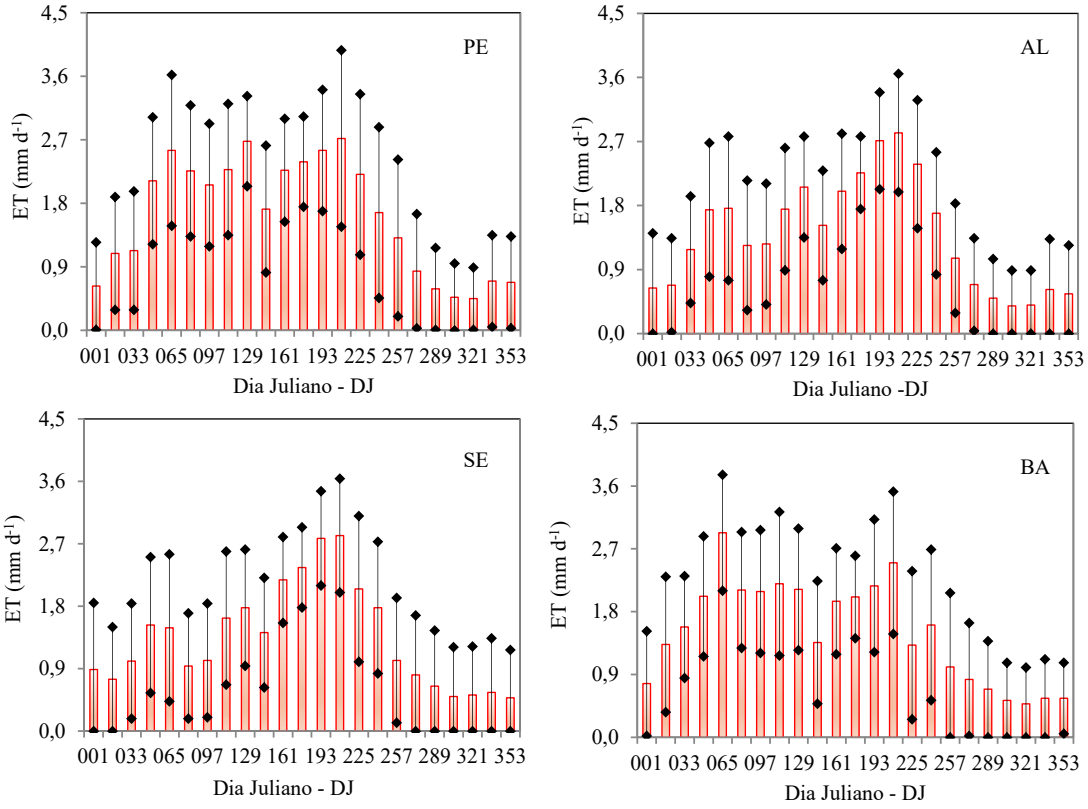


Figura 04: Dinâmica dos valores médios diários da evapotranspiração atual (ET), na escala de 16 dias das imagens MODIS, nas áreas do Baixo São Francisco limitadas pelos estados de Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA), em termos de dia juliano (DJ), durante o ano de 2024.

De acordo com a dinâmica ao longo do ano de 2024, as maiores taxas da ET, acima de 3,5 mm dia^{-1}, considerando os valores médios e desvios padrões, ocorreram de julho a agosto (DJ 209 a 224) para as áreas do Baixo São Francisco limitadas pelos estados PE, SE e AL, enquanto estes ocorreram no período de DJ 65 a 80 (março) para BA contendo apenas Caatinga nas condições mais quente do bioma, coincidindo com seu período mais chuvoso nessas condições. Durante estes períodos de elevada umidade na zona das raízes provida pelas águas das chuvas, as espécies desse bioma se tornam tão verdes com culturas irrigadas (Teixeira, 2010). Por outro lado, os menores valores da ET, abaixo de 1,0 mm dia^{-1}, ocorreram no período de DJ 305 a 336 (novembro a dezembro), coincidindo com períodos de poucas chuvas (ver também Figura 02).

Através de medições com sistema das correlações turbulentas entre 2014 e 2015 no bioma Caatinga, Silva et al. (2017) encontraram valores médios diários da ET de 0,98 mm d^{-1} no período mais seco a 1,96 mm d^{-1} no período chuvoso. Os valores com relação ao do estudo corrente para este bioma são devido às áreas da Caatinga dentro do Baixo São Francisco estarem mais próxima do litoral, diferenciando-se daquela dos referidos autores mais para o oeste do Brasil. Entretanto, através de técnicas de balanço de energia, também para o período de 2014 a 2015 na Caatinga, Marques et al. (2020) reportaram valores médios diários da ET entre 0,20 e 0,30 mm d^{-1} durante o período seco e de 1,70 a 2,60 mm d^{-1} na estação chuvosa, similares aos nossos resultados nesse bioma. O valor médio encontrado no Baixo São Francisco, considerando apenas as áreas no bioma Caatinga, é de 1,41 ±0,47 mm d^{-1}, produzindo uma faixa de 0,94 a 1,88 mm d^{-1} corroborando com os resultados reportados na literatura.

Através de medições dos componentes do balanço hídrico entre 2013 e 2018 na Floresta Atlântica, Pereira et al. (2010) encontraram uma média diária da ET de 3,20 mm d^{-1}, maior que o encontrado no atual estudo para esse bioma, de 1,57 ±0,46 mm d^{-1} (faixa de 1,11-2,03 mm d^{-1}), entretanto, também com medidas de balanço hídrico para o mesmo período e bioma, Rodrigues et al. (2021) reportaram valores médios da ET similares aos nossos, entre 1,40 e 1,80 mm d^{-1}.

A similaridade dos resultados da aplicação do SAFER para o Baixo São Francisco, envolvendo os biomas Caatinga e Floresta Atlântica, com a maioria dos reportados na literatura sob diferentes condições ambientais, fornece confidência no algoritmo com os ajustes apenas considerando as distintas demandas atmosféricas (Eq. 1).

As diferenças nos valores da ET entre os biomas com distintos agroecossistemas podem ser causados por diferentes níveis de umidade na zona das raízes, mas os fluxos hídricos podem ser também controlados pela energia disponível às superfícies vegetadas (Seneviratne et al., 2010). Entretanto, deve-se destacar que outra importante razão para variações na ET entre os agroecossistemas pode ser as diferenças na cobertura do solo pela vegetação, que afeta a quantidade de radiação solar absorvida e as partições da ET em transpiração e evaporação (Villalobos et al., 2013).

A Figura 05 apresenta a dinâmica dos valores médios diários da BIO na escala de 16 dias das imagens MODIS para as áreas do Baixo São Francisco dentro dos estados PE, AL, SE e BA.

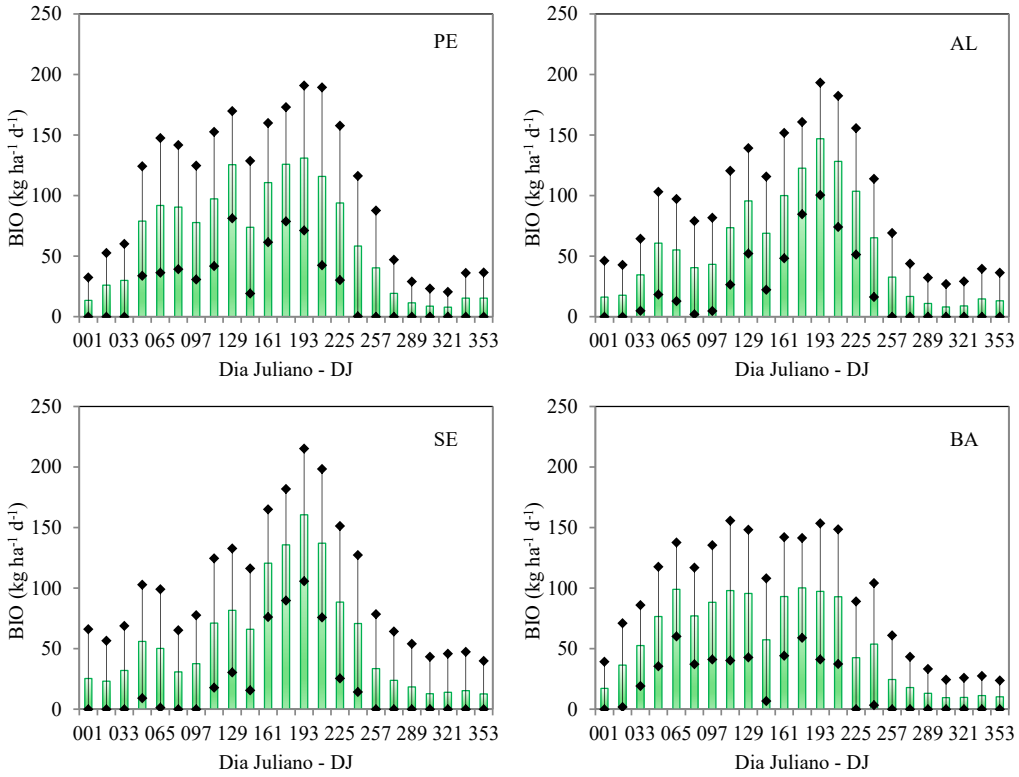


Figura 05: Dinâmica dos valores médios diários da produção de biomassa (BIO), na escala de 16 dias das imagens MODIS, nas áreas do Baixo São Francisco limitadas pelos estados de Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA), em termos de dia juliano (DJ), durante o ano de 2024.

Os maiores valores da BIO, acima de 190 kg ha^{-1} d^{-1}, ocorreram em julho (DJ 193 a 208), nas áreas do Baixo São Francisco dentro dos estados de PE, AL e BA, enquanto para o BA o pico foi em torno de 156 kg ha^{-1} d^{-1} de abril a maio (DJ 113-128), após o período chuvoso dessas regiões (Figuras 02 e 05). As diferenças nos tempos de ocorrência entre os picos das precipitações e da BIO estão relacionadas com o atraso que a água das chuvas se infiltram para elevar o nível de umidade na zona das raízes (Teixeira et al., 2024).

Através de medições com sistema das correlações turbulenta, na Caatinga de 2014 a 2015, Silva et al. (2017) reportaram que as espécies desse bioma agem como fontes de carbono para a atmosfera durante os períodos mais secos produzindo baixos valores da BIO, e como consumidoras de carbono nos períodos mais úmidos elevando suas taxas. Rebello et al. (2020), processando imagens MODIS no período de 2012 a 2015, reportaram que a BIO nos agroecossistemas da Floresta Atlântica as condições de seca impactaram negativamente a BIO, seguindo-se por uma forte recuperação nas suas taxas com o retorno das chuvas.

Estes resultado prévios da BIO na literatura estão em concordância com os nossos, onde as taxas da BIO se relacionaram bem a distribuição das chuvas com taxas médias de 55 ± 23 e 69 ± 28 kg ha^{-1} d^{-1}, para as áreas do Baixo São Francisco dentro dos biomas Caatinga e Floresta Atlântica, respectivamente. Como há uma correlação entre a BIO e a ET, a umidade na zona das raízes controla a BIO quando a água é um fator limitante, enquanto quando esta umidade é alta, a BIO é mais afetadas pela energia disponível (SENEVIRATNE et al., 2010).

Comentários finais

Foi demonstrada a viabilidade da aplicação de geotecnologias para detecção das diferenças espaciais da evapotranspiração atual (ET) e da produção da biomassa (BIO) em regiões com distintas condições ambientais com uso de imagens MODIS e uma rede de estações climáticas no Baixo São Francisco. Variações espaciais e temporais da ET e da BIO entre as regiões dessa bacia limitadas pelos estados Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e (BA) foram detectadas. O uso do produto reflectância em conjunto com dados climáticos se destaca como uma ferramenta eficiente para monitoramento operacional das condições hídricas e da vegetação ao longo do ano, em intervalos de 16 dias e resolução espacial de 250 m na bacia do Baixo São Francisco, destacando o potencial para subsídios políticos para gerenciamento dos recursos naturais em diferentes agroecossistemas.

Embora os métodos tenham sido testados para apenas um ano, o sucesso do uso conjunto do produto MODIS reflectância e dados climáticos interpolados podendo serem usados para implementação de um sistema de monitoramento operacional com uso de dados históricos, com suficiente detalhes para diferenciação de agroecossistemas usando indicadores ambientais.

As determinações espaciais da ET e da BIO têm grande potencial para suporte à políticas públicas relacionadas ao manejo e conservação dos recursos naturais no Baixo São Francisco, com possibilidade de replicação dos métodos em outras condições ambientais e aplicações futuras podem focar na detecção e anomalias nesses indicadores ambientais para específicos períodos do ano com relação a séries históricas de dados obtidos por sensoriamento remoto e climáticos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo suporte ao projeto de aplicação de geotecnologias na Bacia do Rio São Francisco através do Processo, nº 304124/2025-7.

Referências Bibliográficas

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy, 300 pp., 1998.

RIBEIRO, M.C.; METZGER, J.P.; MARTENSEN, A.C.; PONZONI, F.J.; HIROTA, M.M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, 1141–1153, 2009.

FOLEY, J.; DEFRIES, R.; ASNER, G.P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S.R.; CHAPIN, F.S.; COE, M.T.; DAILY, C.G.; GIBBS, H.K.; HELKOWSKI, J.H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E.A.; KUCHARICK, C.J.; MONFREDA, C.; PATZ, J.A.; PRENTICE, I.C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P.K. Global consequences of land use. **Science**, v. 309, p. 570-574, 2005.

GUNKEL, G.; KOSMOL, J.; SOBRAL, M.; ROHN, H.; MONTENEGRO, S.; AURELIANO, J. Sugar cane industry as a source of water pollution-case study on the situation in Ipojuca River, Pernambuco, Brazil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 180, p. 261-269, 2007.

MARQUES, T.V.; MENDES, K.; MUTTI, P.; MEDEIROS, S.; SILVA, L.; PEREZ-MARIN, A.M.; CAMPOS, S.; LÚCIO, P.S.; LIMA, K.; REIS, J. dos; RAMOS, T.M.; SILVA, D. F. da; OLIVEIRA, C.P.; COSTA, G.B.; ANTONINO, A.C.D.; MENEZES, R.S.C.; SANTOS e SILVA, C.M.; BERGSON., B.B. Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally Dry Tropical Forests (Caatinga) in the Brazilian Semiarid. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 287, 107957, 2020.

MONTEITH, J.L. Climate and efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society Series B**, v. 281, p. 277-294, 1977.

PEREIRA, D.R., de MELLO, C.R., da SILVA, A.M., YANAGI, S.N.M. Evapotranspiration and estimation of aerodynamic and stomatal conductance in a fragment of Atlantic Forest in Mantiqueira range region, MG. **Cerne**, v. 16, 32–40, 2010.

RAUPASCH, M.R. Combination theory and equilibrium evaporation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 127, p. 1149−1181, 2001.

REBELLO, V. P. A., GETIRANA, A., FILHO, O. C. R., LAKSHMI, V. Spatiotemporal vegetation response to extreme droughts in eastern Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, 100294, 2020.

RIBEIRO, M.C.; METZGER, J.P.; MARTENSEN, A.C.; PONZONI, F.J.; HIROTA, M.M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, 1141–1153, 2009.

RODRIGUES, A.F.; MELLO, C.R. de; TERRA, M.C.N.S.; BESKOW, S. Water balance of an Atlantic Forest remnant under a prolonged drought period. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 45, e008421, 2021.

SANTOS, M.G.; OLIVEIRA, M.T.; FIGUEIREDO, K.V. Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: can it tolerate climate changes? **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, p. 83–99, 2014.

SENEVIRATNE, S.I., CORTI, T., DAVIN, E.L., HIRSCHI, M., JAEGER, E. B., LEHNER, I., ORLOWSKY, B., TEULING, A.J. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 99, 125–161, 2010.

SILVA, P.F. da; LIMA, J.R. de S.; ANTONINO, A.C.D.; SOUZA, R.; SOUZA, E.S. de; SILVA, J.R.I.; ALVES, E.M. Seasonal patterns of carbon dioxide, water, and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 147, p. 71–82, 2017.

TEIXEIRA, A.H. de C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco River basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1287-1319, 2010.
TEIXEIRA, A.H. de C., LEIVAS, J.F., TAKEMURA, C.M., PACHECO, E.P., GARÇON, E.A.M., SOUSA, I.F.; ALMEIDA,

A.Q., THENKABAIL, P. S., AZEVEDO, A.F.M. S., 2024. Modeling and Monitoring Water Productivity by Using Geotechnologies In: Thenkabail, P. S. (Ed.), Remote Sensing Handbook, v. V, ed. 2: CRC Press, pp. 383 - 421.

VILLALOBOS, F. J., TESTI, L., ORGAZ, F., GARCIA-TEJERA, O., LOPEZ-BERNAL, A., GONZALEZ-DUGO, M. V., BALLESTER-LURBE, C., CASTEL, J. R., ALARCON-CABANERO, J. J., NICOLAS-NICOLAS, E. (2013). Modelling canopy conductance and transpiration of fruit trees in Mediterranean areas: A simplified approach. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 171, 93–103, 2013.

YANG, Y.; GUAN, H.; BATELAAN, O.; MCVICAR, T. R.; LONG, D.; PIAO, S.; LIANG, W.; LIU, B.; JIN, Z.; SIMMONS, C.T. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems. **Scientific Reports**, v. 6, p. 1-8, 2016.

ZHANG, L; QIAO, N.; HUANG, C.; WANG, S. Monitoring drought effects on vegetation productivity using satellite solar-induced chlorophyll fluorescence. **Remote Sensing**. v. 11, n. 378, p. 1-18, 2019.

ZHAO, M.; RUNNING, S.W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. **Science**, v. 328, 940-943, 2010.

IMPACTOS DO MANEJO INTEGRADO DE BANCO DE DADOS AMBIENTAIS NA MITIGAÇÃO DE LACUNAS DE INFORMAÇÃO EM GRANDES COMPLEXOS INDUSTRIAIS

1 Danilo Barbosa Ferreira, 2 Christian Milanez Preis, 3 Kátia Abdalla B. Abib

1 Water Services and Technologies – Consultoria de Mineração, e-mail: danilo.ferreira@waterservicestech.com; 2 Water Services and Technologies, e-mail: christian.preis@waterservicestech.com; 3 AK Ambiental – Consultoria de Gerenciamento Ambiental, e-mail: katia@akambiental.com.br

Palavras-chave: Gestão de dados ambientais; Valor económico de dados; Monitoramento ambiental integrado.

Resumo

A gestão de dados ambientais em áreas industriais é fundamental para subsidiar a tomada de decisão e garantir a confiabilidade das avaliações ambientais, especialmente em empreendimentos de grande porte, nos quais há geração contínua de informações provenientes de múltiplas matrizes ambientais (IBM, 2024). Entretanto, a fragmentação de dados e a ausência de sistemas estruturados de gerenciamento podem comprometer a rastreabilidade e a integridade dessas informações, dificultando análises históricas e a identificação de inconsistências (Li et al., 2013).

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo aplicar um sistema de gestão integrada de dados ambientais em uma unidade de beneficiamento de minério, utilizando o software HydroGeo Analyst, visando identificar lacunas de informação, recuperar dados históricos e quantificar o valor econômico associado às amostras reintegradas ao banco de dados. A metodologia envolveu a consolidação de um banco contendo 592 pontos de monitoramento, estruturado em modelo relacional (ponto–amostra–resultado), seguido da realização de consultas sistemáticas e cruzamento de informações com relatórios técnicos para identificação de gaps referentes ao período de 2021 a 2023.

Como resultado, foram recuperadas 695 amostras ambientais previamente não incorporadas ao sistema, evidenciando falhas na integração de dados. A análise econômica associada demonstrou que o valor total recuperado atingiu aproximadamente R$ 3,47 milhões, sendo a matriz solo/sedimento responsável pela maior parcela (53%), seguida por água subterrânea (37%) e água superficial (10%). Esses resultados evidenciam que, embora algumas matrizes apresentem maior volume de dados, o impacto econômico está diretamente relacionado à complexidade dos processos de coleta e análise, conforme discutido por Wu et al. (2022).

Adicionalmente, observou-se que a implementação de um sistema estruturado de gestão de dados permitiu não apenas a organização das informações, mas também a identificação de inconsistências que não seriam detectadas em sistemas fragmentados, corroborando a literatura sobre a importância da integração de dados ambientais para garantir sua rastreabilidade e confiabilidade (Fitch et al., 2015; Rau et al., 2020).

Conclui-se que a gestão integrada de dados ambientais, associada à utilização de ferramentas especializadas, constitui um elemento estratégico para otimização de recursos, recuperação de informações e suporte à tomada de decisão em empreendimentos industriais. Além disso, a incorporação da valoração econômica dos dados representa uma abordagem inovadora, evidenciando que a perda de informações ambientais pode implicar não apenas prejuízos técnicos, mas também perdas financeiras significativas.

Introdução

A gestão ambiental em áreas industriais depende diretamente da aquisição, organização e interpretação de dados provenientes de diferentes matrizes ambientais, como água superficial, água subterrânea, solo e sedimentos. Esses dados são fundamentais para subsidiar avaliações de qualidade ambiental, identificação de contaminação e tomada de decisão em processos de gestão e remediação (IBM, 2024). Nesse contexto, programas de monitoramento ambiental são estruturados a partir da definição de pontos de amostragem georreferenciados e da realização de campanhas periódicas, gerando grandes volumes de dados ao longo do tempo.

Entretanto, em complexos industriais de grande porte, como unidades de beneficiamento mineral, o volume e a heterogeneidade dessas informações tornam a gestão integrada dos dados um desafio significativo. A fragmentação de bases de dados, falhas na integração de resultados analíticos e inconsistências na estruturação das informações podem comprometer a rastreabilidade dos dados e, consequentemente, a confiabilidade das análises ambientais (Li et al., 2013). Além disso, a ausência de sistemas estruturados de gerenciamento pode dificultar a identificação de lacunas de dados e prejudicar a continuidade das séries históricas de monitoramento.

Diante desse cenário, o uso de softwares especializados para gestão de dados ambientais tem se consolidado como uma estratégia eficiente para organizar, integrar e analisar grandes volumes de informações. Ferramentas como o *HydroGeo Analyst* permitem a estruturação de bancos de dados relacionais baseados em pontos de monitoramento georreferenciados, associados a diferentes matrizes ambientais e vinculados a campanhas de amostragem e resultados analíticos (Waterloo Hydrogeologic, 2024). Essa organização favorece a rastreabilidade dos dados, a realização de consultas avançadas, a geração de gráficos e a modelagem espacial, como mapas de plumas de contaminação (Fitch et al., 2015).

Outro aspecto relevante refere-se ao custo associado à geração de dados ambientais. A obtenção de uma única amostra envolve diversas etapas, incluindo mobilização de equipes, instalação de pontos de monitoramento, desenvolvimento de poços

de água subterrânea, coleta de amostras, análises laboratoriais e tratamento dos dados. Esses processos representam investimentos significativos, tornando os dados ambientais ativos de alto valor para as organizações (Wu et al., 2022). Dessa forma, a perda, não integração ou baixa aplicabilidade dos usos desses dados pode resultar não apenas em prejuízos técnicos, mas também econômicos.

Nesse contexto, a organização estruturada de bancos de dados ambientais não apenas melhora a eficiência operacional, mas também possibilita a identificação de inconsistências e lacunas de informação que, de outra forma, poderiam passar despercebidas. A consolidação de dados em plataformas integradas permite a realização de análises críticas, identificação de dados ausentes e recuperação de informações históricas, contribuindo diretamente para a robustez das avaliações ambientais e para a tomada de decisão (Rau et al., 2020).

Dessa forma, a estruturação adequada de bancos de dados ambientais se torna um elemento estratégico para garantir a continuidade de séries históricas, a confiabilidade das análises e a efetividade da gestão ambiental em empreendimentos complexos. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar a aplicação de um sistema de gestão integrada de dados ambientais em uma unidade de beneficiamento de minério, utilizando o software HydroGeo Analyst, destacando como a organização estruturada do banco de dados possibilitou a identificação de lacunas de informação, a recuperação de dados históricos e a quantificação do valor econômico associado às amostras reintegradas ao sistema.

Material e Métodos

O presente estudo foi desenvolvido a partir da gestão e reestruturação do banco de dados ambientais de uma unidade de beneficiamento de minério, contemplando informações históricas de monitoramento ambiental referentes às matrizes água superficial, água subterrânea e solo/sedimento. O banco de dados analisado possuía, ao final do levantamento, 592 pontos de monitoramento cadastrados, distribuídos espacialmente na área do empreendimento, conforme apresentado na Figura 01.

A gestão dos dados foi realizada com o uso do *HydroGeo Analyst* (HGA), um software amplamente utilizado para gerenciamento de dados hidrogeológicos e ambientais, baseado em estrutura de banco de dados relacional. Nesse sistema, os dados são organizados de forma hierárquica e integrada, estabelecendo relações entre diferentes níveis de informação: pontos de monitoramento, eventos de amostragem (amostras) e resultados analíticos.

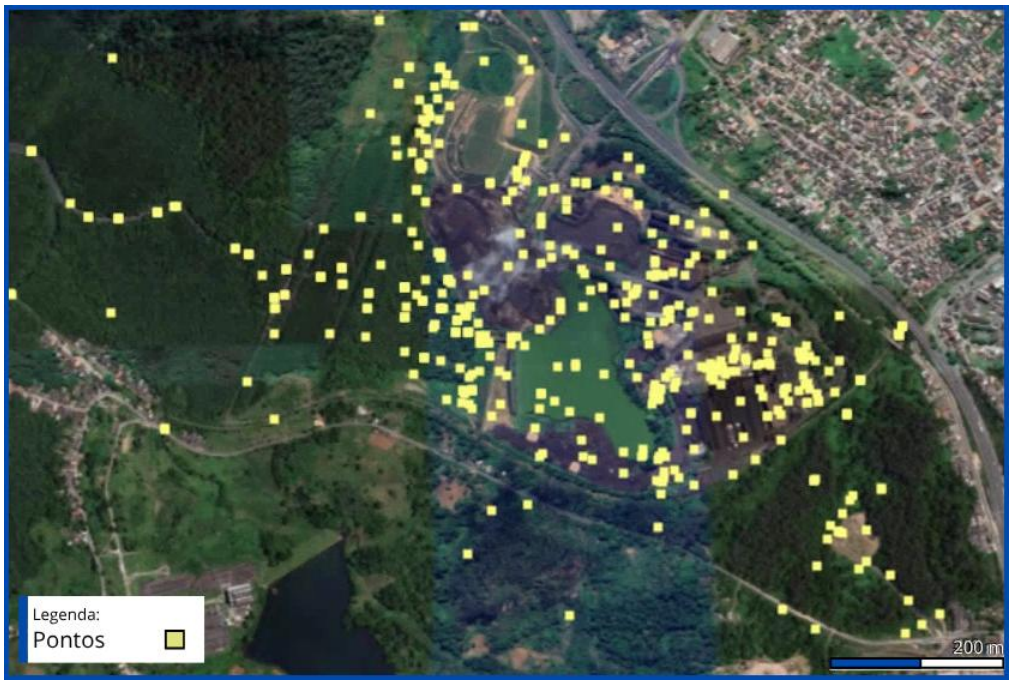
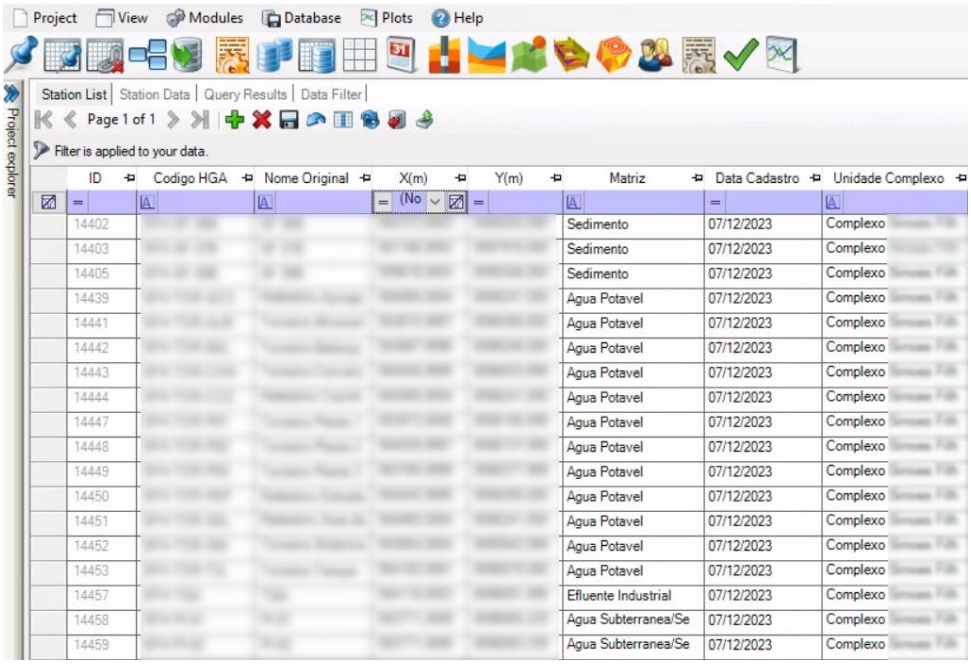


Figura 01: Mapa de distribuição dos pontos do banco de dados.
Fonte: Autoral (2026)

No HGA, cada ponto de monitoramento é identificado por um código único e associado a informações geoespaciais, permitindo sua representação cartográfica e integração com análises espaciais. Esses pontos são categorizados de acordo com a matriz ambiental correspondente (água superficial, água subterránea, solo/sedimento, etc). A interface do sistema possibilita a visualização e organização dessas informações em formato tabular, conforme ilustrado na Figura 2.



ID	Codigo HGA	Nome Original	X(m)	Y(m)	Matriz	Data Cadastro	Unidade Complexo
14402					Sedimento	07/12/2023	Complexo
14403					Sedimento	07/12/2023	Complexo
14405					Sedimento	07/12/2023	Complexo
14439					Agua Potavel	07/12/2023	Complexo
14441					Agua Potavel	07/12/2023	Complexo
14442					Agua Potavel	07/12/2023	Complexo
14443					Agua Potavel	07/12/2023	Complexo
14444					Agua Potavel	07/12/2023	Complexo
14447					Agua Potavel	07/12/2023	Complexo
14448					Agua Potavel	07/12/2023	Complexo
14449					Agua Potavel	07/12/2023	Complexo
14450					Agua Potavel	07/12/2023	Complexo
14451					Agua Potavel	07/12/2023	Complexo
14452					Agua Potavel	07/12/2023	Complexo
14453					Agua Potavel	07/12/2023	Complexo
14457					Efluente Industrial	07/12/2023	Complexo
14458					Agua Subterranea/Se	07/12/2023	Complexo
14459					Agua Subterranea/Se	07/12/2023	Complexo

Figura 02: Interface do HGA com a organização de informações dos pontos cadastrados separados por colunas.
Fonte: Autoral (2026)

A partir dos pontos cadastrados, são vinculados os eventos de amostragem, sendo que cada amostra possui um identificador único (código de amostra) e está associada a um ponto específico e a uma data de coleta. Essa estrutura permite a rastreabilidade completa dos dados, desde a localização do ponto até os resultados analíticos obtidos por intermédio de filtragens direcionadas. A organização dessas amostras no banco de dados é apresentada na Figura 3.

Os resultados analíticos, por sua vez, são vinculados diretamente às amostras, constituindo um sistema relacional em que múltiplos parâmetros podem ser associados a uma única amostra. Essa estrutura possibilita a realização de consultas avançadas, filtros por parâmetros específicos, análises temporais e espaciais, além da geração de produtos como gráficos e mapas de plumas de contaminação.

Station	sample_id	sample_name	sample_date	sample_time	quality_code	samp_matrix	legislacaoref	samp_reason
14229			05/04/2021	09:38:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14229			28/09/2018	08:42:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14229			12/10/2019	13:41:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14229			03/08/2016	17:15:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14230			05/04/2021	09:48:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14230			28/09/2018	09:01:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14230			12/10/2019	13:32:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14230			03/08/2016	17:10:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14231			05/04/2021	09:53:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14231			28/09/2018	09:18:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14231			12/10/2019	13:25:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14231			03/08/2016	17:05:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14232			05/04/2021	10:00:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14232			28/09/2018	09:36:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14232			12/10/2019	13:16:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14232			03/08/2016	16:57:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14233			05/04/2021	10:10:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14233			28/09/2018	09:52:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14233			12/10/2019	13:09:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14233			03/08/2016	16:50:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14234			05/04/2021	10:16:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con
14234			28/09/2018	10:10:00	O	Solo	CONAMA 454 Do	Atendimento Con

Figura 03: Colunas de organização de código de amostras vinculadas aos pontos.
Fonte: Autoral (2026)

A metodologia adotada neste trabalho consistiu inicialmente na consolidação e padronização do banco de dados existente no HGA, garantindo a integridade das relações entre pontos, amostras e resultados. Em seguida, foram realizadas consultas sistemáticas no banco de dados por meio de filtros e cruzamento de informações, com o objetivo de identificar

inconsistências e lacunas de dados (*gaps*). Essa etapa envolveu a análise comparativa entre registros disponíveis no banco de dados e informações provenientes de relatórios técnicos e estudos ambientais previamente realizados no empreendimento.

A identificação dos *gaps* foi conduzida por meio da verificação da existência de eventos de amostragem esperados para determinados pontos e períodos, considerando o histórico de campanhas de monitoramento. Foram identificadas lacunas de dados associadas a campanhas realizadas no período de 2021 a 2023, caracterizadas pela ausência de registros no banco de dados para amostras previamente executadas.

Após a identificação das lacunas, foi realizado um processo de investigação documental para localização dos dados faltantes. Essa etapa envolveu a análise de relatórios técnicos, planilhas laboratoriais e registros históricos do empreendimento, abrangendo estudos conduzidos no período de 2021 a 2023. Ressalta-se que a recuperação desses dados ocorreu em outubro de 2025, o que aumentou a complexidade do processo devido ao intervalo temporal entre a geração e a integração das informações.

Paralelamente à recuperação dos dados, foi conduzida a quantificação do valor econômico associado às amostras identificadas como ausentes. Para isso, foi realizado o levantamento dos custos unitários relacionados às diferentes etapas de geração de dados ambientais, conforme informações fornecidas pelo empreendimento. Esses custos incluíram atividades como instalação de pontos de monitoramento, desenvolvimento de poços de água subterrânea, execução de campanhas de amostragem, análises laboratoriais e elaboração de relatórios técnicos.

O valor total associado a cada amostra foi estimado a partir da composição desses custos unitários, considerando que cada registro no banco de dados representa o resultado final de um conjunto de atividades técnicas e operacionais. Dessa forma, foi possível atribuir um valor monetário às amostras posteriormente recuperadas, permitindo a avaliação do impacto econômico da ausência desses dados no banco de dados ambiental.

Cabe destacar que os valores utilizados para essa estimativa são específicos do empreendimento analisado, sendo influenciados por fatores como localização, fornecedores, período de execução dos serviços e escopo das campanhas. Dessa forma, os resultados obtidos não devem ser generalizados, mas sim interpretados como uma análise aplicada a um contexto específico.

Por fim, após a localização e validação dos dados faltantes, foi realizada a reintegração das informações ao banco de dados no HGA, restabelecendo a integridade das séries históricas de monitoramento ambiental. Esse processo permitiu não apenas a recuperação de dados relevantes, mas também a consolidação de um sistema de gestão mais robusto, capaz de suportar análises futuras e subsidiar a tomada de decisão de forma mais eficiente.

Resultados e Discussão

A aplicação da metodologia de gestão integrada de dados ambientais permitiu a identificação e posterior recuperação de um volume expressivo de informações anteriormente não incorporadas ao banco de dados. No total, foram recuperadas 695 amostras distribuídas entre as matrizes água subterrânea, água superficial e solo/sedimento, evidenciando a existência de lacunas relevantes associadas ao período de 2021 a 2023.

A Figura 4 complementa essa análise ao apresentar a distribuição dos custos associados às diferentes etapas de geração de dados ambientais buscando o paralelo económico associado. Observa-se que atividades como execução de campanhas de campo e análises laboratoriais representam parcelas significativas do investimento total. Esses resultados corroboram estudos que apontam que os custos de monitoramento ambiental são fortemente influenciados por fatores logísticos e analíticos, sendo a coleta e análise laboratorial os principais componentes do custo total (Li et al., 2013).

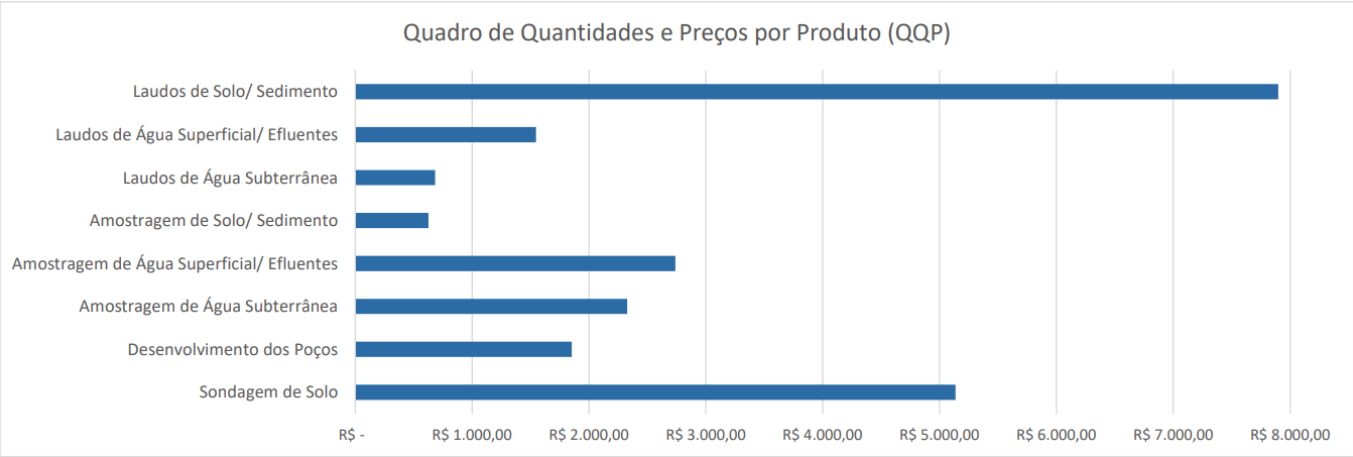


Figura 04: Valor gasto para execução de cada atividade pertinente à geração de dados ambientais.
Fonte: Autoral (2026)

A distribuição dessas amostras por matriz (Figura 5a) indica predominância da água subterrânea, seguida por solo/sedimento e, por fim, água superficial. Esse comportamento pode ser explicado pela maior densidade de pontos de monitoramento associada a sistemas aquíferos em áreas de mineração, onde o controle de contaminação subterrânea é uma exigência

recorrente em programas de monitoramento ambiental (Rau et al., 2020). Estudos semelhantes apontam que programas de monitoramento em ambientes industriais tendem a priorizar a água subterrânea devido à sua relevância para avaliação de riscos ambientais e à complexidade dos processos de transporte de contaminantes nesse meio (Bui et al., 2012).

Entretanto, ao analisar os dados sob a perspectiva econômica (Figura 5b), observa-se um comportamento distinto. Embora a água subterrânea apresente o maior número de amostras recuperadas, a matriz solo/sedimento representa a maior parcela do valor total associado aos dados recuperados. Esse resultado evidencia que o custo unitário de geração de dados varia significativamente entre matrizes, refletindo diferenças nos procedimentos de coleta, preparação de amostras e análises laboratoriais.

A análise econômica dos dados recuperados (Figura 5b) evidencia que o valor total associado às amostras reintegradas ao banco de dados atinge aproximadamente R$ 3.474.617,59, demonstrando a magnitude do investimento previamente realizado e que não estava sendo plenamente aproveitado. Dentre as matrizes avaliadas, o maior valor monetário está associado ao solo/sedimento, que representa cerca de 53% do total (R$ 1.846.153,38), seguido pela água subterrânea, com aproximadamente 37% (R$ 1.298.478,82), e pela água superficial, que corresponde a cerca de 10% (R$ 329.985,39). Observa-se, portanto, que, embora a água subterrânea apresente o maior número de amostras recuperadas, o maior impacto econômico está associado à matriz solo/sedimento, evidenciando diferenças significativas no custo unitário de geração de dados entre as matrizes. Esse resultado reforça que a análise baseada exclusivamente em quantitativos pode subestimar a relevância econômica de determinadas informações, sendo fundamental incorporar a dimensão financeira na avaliação da gestão de dados ambientais para a unidade.

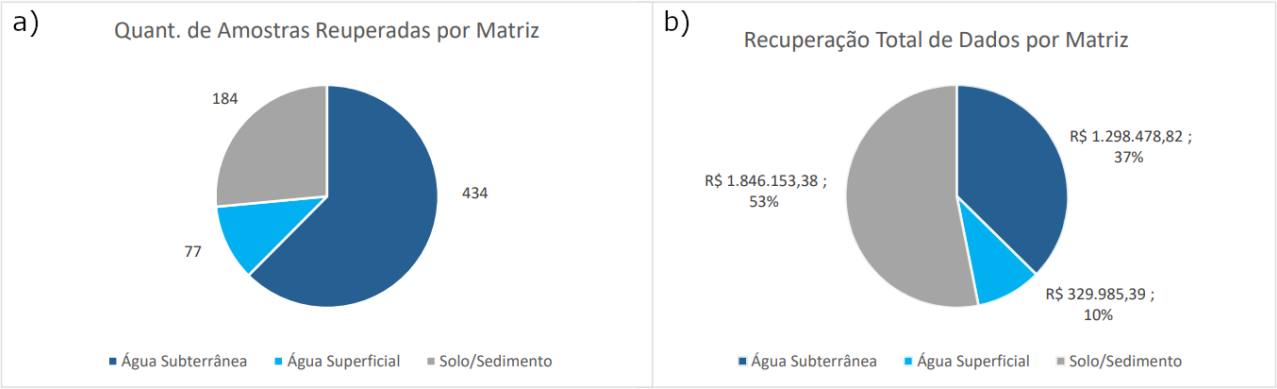


Figura 05: (a) Quantitativo por matriz de amostras recuperadas para o banco de dados e (b) custo total gasto por matrizes para geração dos resultados recuperados.
Fonte: Autoral (2026)

De forma geral, amostras de solo e sedimento tendem a envolver processos mais complexos, incluindo etapas de coleta mais invasivas, preparo laboratorial mais elaborado e análises químicas frequentemente mais extensas, o que eleva o custo associado a cada dado gerado. Essa relação entre complexidade analítica e custo já foi observada em estudos sobre otimização de programas de monitoramento ambiental, nos quais se destaca que diferentes matrizes possuem demandas operacionais e analíticas distintas, impactando diretamente os custos totais dos programas (Wu et al., 2022).

Além da análise quantitativa e econômica, os resultados evidenciam o papel fundamental da gestão estruturada de dados na identificação de lacunas de informação. A ausência de integração entre diferentes fontes de dados, como relatórios técnicos e resultados laboratoriais, é frequentemente apontada como um dos principais desafios em sistemas de monitoramento ambiental (Fitch et al., 2015). No presente estudo, a utilização de um banco de dados relacional permitiu não apenas a organização das informações, mas também a realização de consultas sistemáticas capazes de identificar inconsistências que não seriam facilmente detectadas em sistemas fragmentados.

A defasagem temporal entre a geração dos dados (2021–2023) e sua recuperação (2025) também representa um aspecto relevante a ser discutido. Estudos indicam que a perda de rastreabilidade ao longo do tempo é um problema recorrente em bancos de dados ambientais não estruturados, dificultando a recuperação de informações históricas e comprometendo análises de longo prazo (Rau et al., 2020). Nesse sentido, os resultados obtidos reforçam a importância de sistemas integrados para garantir a continuidade e a confiabilidade das séries temporais de monitoramento e vínculo de diferentes campanhas de análises.

Outro ponto de destaque é a quantificação do valor econômico associado aos dados recuperados. A atribuição de valor monetário às amostras permitiu evidenciar que a ausência desses dados no banco não representava apenas uma lacuna técnica, mas também uma perda econômica significativa. Essa abordagem ainda é pouco explorada na literatura, que tradicionalmente foca na qualidade e na representatividade dos dados, mas menos frequentemente na valoração econômica das informações ambientais. No entanto, estudos recentes têm destacado a importância de incorporar análises econômicas na gestão de dados ambientais, especialmente no contexto de otimização de recursos e tomada de decisão (Wu et al., 2022).

Por fim, os resultados demonstram que a implementação de sistemas estruturados de gestão de dados ambientais vai além da organização da informação, atuando como ferramenta estratégica para identificação de falhas, recuperação de dados e maximização do valor dos investimentos realizados em monitoramento ambiental. Essa abordagem contribui diretamente para o aumento da eficiência operacional e para o fortalecimento da base técnica utilizada na tomada de decisão em empreendimentos industriais.

Considerações Finais

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a importância da implementação de sistemas estruturados de gestão de dados ambientais em empreendimentos de grande porte, especialmente em contextos que envolvem elevado volume e diversidade de informações, como unidades de beneficiamento mineral. A utilização do HGA mostrou-se uma ferramenta eficaz para organização, integração e análise de dados ambientais, permitindo não apenas a consolidação das informações existentes, mas também a identificação de lacunas que comprometiam a integridade do banco de dados.

A recuperação de dados históricos de monitoramento ambiental, anteriormente não incorporados ao sistema, demonstrou que falhas na gestão de dados podem resultar em perdas significativas tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. A análise realizada evidenciou que cada amostra representa um investimento relevante, envolvendo etapas de campo, laboratório e tratamento de dados, reforçando a necessidade de estratégias eficientes para garantir a rastreabilidade e a preservação dessas informações ao longo do tempo.

Além disso, a abordagem adotada neste trabalho, ao incorporar a valoração econômica dos dados ambientais, contribui para ampliar a compreensão sobre a importância da gestão de dados em empreendimentos industriais. Ao atribuir valor monetário às amostras recuperadas, foi possível demonstrar que a ausência de integração de dados não se limita a uma lacuna informacional, mas representa também uma perda direta de recursos investidos.

Dessa forma, conclui-se que a implementação de sistemas integrados de gestão de dados ambientais não deve ser encarada apenas como uma ferramenta operacional, mas como um componente estratégico na gestão ambiental de empreendimentos industriais. A organização adequada dos dados permite não apenas otimizar análises e apoiar a tomada de decisão, mas também maximizar o retorno dos investimentos realizados em monitoramento ambiental.

Por fim, como limitação do estudo, destaca-se que os valores econômicos atribuídos às amostras são específicos do empreendimento analisado, podendo variar em função de fatores como localização, fornecedores, escopo das campanhas e condições operacionais. Nesse sentido, recomenda-se que estudos futuros explorem a aplicação dessa abordagem em diferentes contextos, bem como o desenvolvimento de metodologias padronizadas para valoração de dados ambientais, ampliando o potencial de aplicação dessa análise na gestão ambiental.

Agradecimentos

Agradeço a Water Services and Technologies pelo fornecimento de apoio e incentivo para a realização da pesquisa juntamente à AK Ambiental pelo fornecimento de dados relevantes para o fechamento do estudo. Por fim, agradeço a Universidade Federal de Minas Gerais e ao programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SMARH-UFMG).

Referências Bibliográficas

BUI, T. D.; TSUTSUMI, A.; MURAYAMA, Y. Land use/land cover change detection and analysis in a rapidly urbanizing region using remote sensing. *Applied Geography*, v. 32, p. 713–725, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.07.005

IBM. What is environmental monitoring? 2024. Disponível em: https://www.ibm.com/think/topics/environmental-monitoring.

LI, et al. Design and implementation of a web-based groundwater data management system. *Mathematics and Computers in Simulation*, v. 94, p. 164–181, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matcom.2012.11.009.

FITCH, P. et al. Integrated groundwater data management. In: *Integrated Groundwater Management*. Cham: Springer, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_26.

WATERLOO HYDROGEOLOGIC. Hydro GeoAnalyst – Environmental Data Management Software. 2024. Disponível em: https://www.waterloohydrogeologic.com/products/hydro-geoanalyst/

WU, J. et al. Optimization of water quality monitoring programs by data mining. *Water Research*, v. 218, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118805.

RAU, G. C. et al. Future-proofing hydrogeology by revising groundwater monitoring practice. *Hydrogeology Journal*, v. 28, p. 2879–2890, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s10040-020-02242-7.

ANÁLISE MULTITEMPORAL DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GUAMÁ E OUTROS (PA)

1 Pedro Henrique Pereira Carneiro, 2 Helisandra Vitória Menezes Pires, 3 Messiany Novaes Sampaio, 4 Pérola Lameira, 5 Moisés Gonçalves Pizon, 6 Franciele do Nascimento Oleriano, 7 Wanessa dos Santos Menezes, 8 Lindemberg Lima Fernandes

1 Universidade Federal do Pará, e-mail: p.henrique6603@gmail.com; 2 Universidade Federal do Pará, e-mail: helisandrapires2@hotmail.com; 3 Universidade Federal do Pará, e-mail: messianysampaio0@gmail.com; 4 Universidade Federal do Pará, e-mail: perola.lameira@itec.ufpa.br; 5 Universidade Federal do Pará, e-mail: moisespizon20@gmail.com; 6 Universidade Federal do Pará, e-mail: Franciele.oleriano032@gmail.com; 7 Universidade Federal do Pará, e-mail: wanessamenezes1999@gmail.com; 8 Universidade Federal do Pará, e-mail: linlimfer@yahoo.com.br.

Palavras-chave: Classe de cobertura; Geoprocessamento; MapBiomas

Resumo

O presente estudo avaliou as transformações da paisagem na Bacia do Rio Guamá e Outros (PA), no período de 1988 a 2024, a partir de técnicas de sensoriamento remoto e dados do MapBiomas. Os resultados indicaram expansão das atividades agropecuárias e do crescimento urbano, acompanhadas pela redução da cobertura florestal, evidenciando mudanças expressivas na configuração territorial ao longo da série histórica. A supressão da vegetação nativa ocasionada pelas atividades antrópicas traz más consequências para a bacia, como grandes impactos ambientais, assoreamento de rios, compactação do solo e desencadeamento de processos erosivos, sendo necessário a preservação da vegetação para garantir o bom funcionamento dos processos que ocorrem em um ecossistema. Por fim, os estudos realizados neste trabalho foram semelhantes aos artigos descritos nas bases de dados utilizadas, reforçando a consistência dos resultados observados no contexto analisado. Portanto, estes achados reforçam a necessidade de planejamento territorial orientado por políticas de proteção ambiental, instrumentos de ordenamento urbano e preservação de áreas legalmente protegidas, além da ampliação de pesquisas que incorporem modelagens hidrológicas para subsidiar a gestão sustentável dos recursos naturais.

Introdução

Inicialmente, o entendimento de bacia hidrográfica reconhece-a como a área topograficamente drenada por um curso d'água ou por um sistema conectado de cursos d'água, de modo que toda a vazão efluente seja descarregada por meio de uma única saída (BARBOSA JUNIOR, 2022). Além do mais, a bacia hidrográfica constitui a unidade territorial fundamental para o planejamento e a gestão integrada dos recursos hídricos, conforme estabelecido pela Lei nº 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos no Brasil. Essa abordagem reconhece a bacia como um sistema ambiental integrado, no qual interagem componentes físicos, biológicos e socioeconômicos, cujas dinâmicas influenciam diretamente a disponibilidade, a qualidade e a sustentabilidade dos recursos hídricos.

No nordeste paraense, intensos processos de desmatamento e conversão de áreas de vegetação primária em pastagens e áreas agrícolas vêm alterando significativamente a configuração da paisagem. Estudos baseados em técnicas de geoprocessamento demonstram redução expressiva da cobertura vegetal densa nas últimas décadas, associada à expansão agropecuária e ao crescimento urbano (PALMEIRA et al. 2022). No contexto das bacias hidrográficas essas transformações impactam a capacidade de infiltração do solo, aumentam o escoamento superficial, favorecem processos erosivos e contribuem para o assoreamento dos cursos d'água. Dessa maneira, a análise do uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas representa ferramenta essencial para compreender as transformações da paisagem e seus reflexos sobre os processos hidrológicos, a segurança hídrica e a resiliência ambiental.

No contexto da gestão estadual, a divisão hidrográfica do Pará foi formalizada pela Resolução CERH nº 004/2008, que institui sete Macro-Regiões Hidrográficas, entre elas a Costa Atlântica–Nordeste, na qual se insere a Bacia do Rio Guamá. Tal normatização reforça a adoção da bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos (PARÁ, 2008). A Bacia Hidrográfica do Rio Guamá e Outros (BHRGO) possui um sistema de drenagem complexo formado por quatros rios que se unem, onde cada um desses rios compõem uma Sub-Bacias (Sub- Bacia do Rio Guamá, Rio Capim, Rio Acará e Rio Moju) a qual eles convergem para um único exultório na Baia do Guajará na capital do estado do Pará (Belém). (BARBOSA et al. 2020). Estudos recentes apontam que a região da Sub – Bacia do Rio Guamá, que representa uma das partes do BHRGO, apresenta elevada precipitação anual (variando entre aproximadamente 2.000 mm e 2.700 mm), relevo predominantemente plano a suavemente ondulado e predomínio de Latossolos Amarelos, fatores que influenciam diretamente os padrões de escoamento superficial, infiltração e vulnerabilidade ambiental (SILVA et al., 2024).

Dessa forma, a análise temporal do uso e ocupação do solo, aliada às ferramentas de sensoriamento remoto e Sistemas de Informações Geográficas (SIG), constitui instrumento estratégico para subsidiar políticas públicas voltadas à gestão integrada da bacia. O monitoramento sistemático das mudanças na cobertura da terra permite identificar vetores de transformação da paisagem, áreas críticas de vulnerabilidade ambiental e tendências de comprometimento hídrico, contribuindo para a formulação de estratégias que promovam a segurança hídrica e a sustentabilidade regional. Portanto, este estudo teve como objetivo analisar

a evolução temporal do uso e ocupação do solo na BHRGO, no período de 1988 a 2024, integrando técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento, a fim de identificar os principais vetores de transformação da paisagem e seus possíveis impactos ambientais sobre a dinâmica hidrológica da bacia.

Materiais e Métodos

A Bacia Hidrográfica do Rio Guamá e Outros (BHRGO) está localizada no estado do Pará, na Região Norte do Brasil. O rio Guamá integra a bacia hidrográfica amazônica e possui grande importância ambiental, econômica e social para o nordeste paraense. Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), área de estudo abrange aproximadamente 89074 km². Considerando sua extensão territorial, a BHRGO pode ser classificada como uma bacia de grande porte no Estado do Pará, apresentando elevada relevância ambiental. A localização bacia pode ser visualizada na Figura 1.

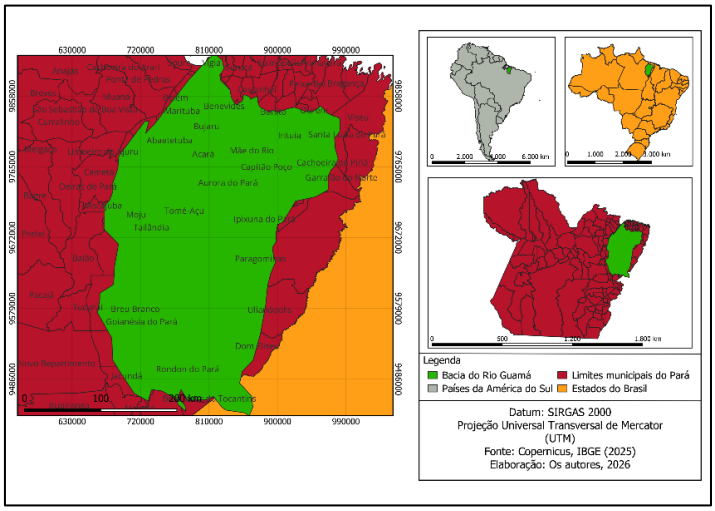


Figura 01: Mapa de Localização da Bacia do Rio Guamá e Outros.
Fonte: Os autores (2026)

Para a elaboração deste trabalho, foram realizados levantamentos bibliográficos em bases de dados científicos, como Google Acadêmico, SciELO e Portal de Periódicos CAPES, com o objetivo de subsidiar o referencial teórico. Para a análise espacial, utilizaram-se dados do MapBiomas, plataforma que gera mapas de uso e cobertura da terra no Brasil. A identificação da cobertura considera não apenas a remoção da vegetação florestal primária, mas também áreas previamente desmatadas (MAURANO; ESCADA, 2019). O MapBiomas utiliza predominantemente imagens dos satélites Landsat (NASA/USGS).

As classes de uso e cobertura da terra utilizadas para o mapeamento foram: Formação Campestre, Corpos d'água, Pastagem, Área Urbanizada e Formação Florestal. A padronização de cores das classes seguiu o código mais recente da Coleção 10 do MapBiomas, garantindo consistência visual e metodológica.

Resultados e Discussões

A partir dos dados obtidos na análise multitemporal do uso e ocupação da terra da Bacia Hidrográfica do Rio Guamá e Outros, foram observadas mudanças significativas na dinâmica do uso da terra no período analisado (Gráfico 1).

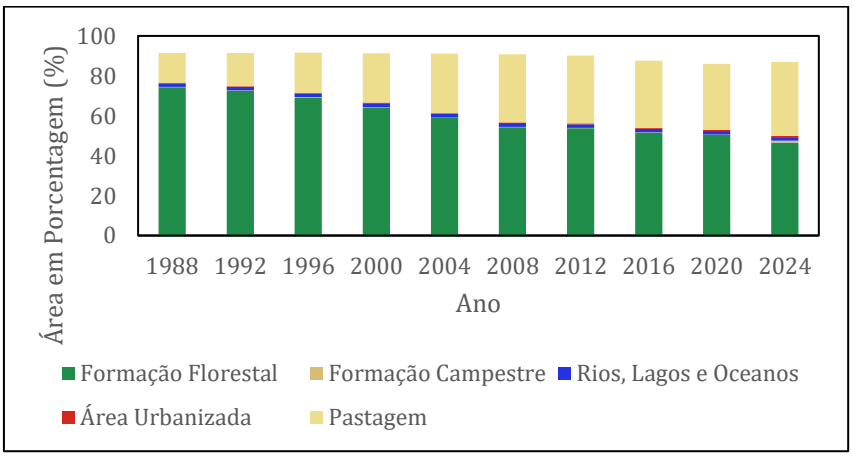


Gráfico 1: Evolução temporal do uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Guamá e Outros (1988 – 2024) em porcentagem (%). Fonte: Os autores (2026).

No início da série histórica (1988) é possível observar uma predominância da classe de cobertura denominada Formação Florestal que ocupava maior parte da área da bacia totalizando 74% de sua extensão, contudo ao longo do tempo o cenário foi se modificando e acontecendo redução desta classe, diminuindo para apenas 47% da área da bacia indicando uma redução de 27% da área dos anos inicias, isso demonstra uma expressiva conversão da vegetação nativa em outro uso da terra que neste caso seria a pastagem. Essa atividade vem a crescer continuamente, pois em 1988 ela correspondia 15% da cobertura da terra, já em 2024 a pastagem passa a ocupar 37,03 % da área da BHRGO. Esse dado revela uma mudança das zonas originalmente florestais para áreas destinadas à agropecuária, demonstrando o crescimento dessa atividade como principal vetor de transformação da paisagem.

Segundo Silva et al. (2017) *apud* Rocha e Lima (2020) a supressão da cobertura vegetal nativa causadas por atividades que intensificam o desmatamento, como agropecuária, podem ocasionar grandes impactos ambientais, como assoreamento de rios, compactação do solo, desencadeamento de processos erosivos, a preservação da vegetação é de extrema importância pois ela garante o bom funcionamento dos processos que ocorrem em um ecossistema como infiltração ou escoamento, balanço de energia e manutenção de condições do clima.

Em contrapartida a Formação Campestre demonstrou baixa representatividade na ocupação da área de estudo, apresentando-se praticamente estável durante ao longo da série histórica analisada, mostrando que essa classe não sofreu grandes pressões de modificação comparada a Formação Florestal e Pastagem, porém no último ano da série histórica em 2024 ela possui um aumento expressivo de 0,81% comparado aos anos iniciais

Com relação a Área Urbanizada, apesar de ser uma ocupação menos extensiva, porém também indicou um crescimento gradual, pois ela inicia com uma porção territorial de 0,25% e passa a atingir 0,54% no fim da série histórica analisada, isso demonstra aumento de 0,29% da ocupação antrópica no território da bacia. Em seu estudo Neto et al. (2014) afirma que o aumento da urbanização em uma bacia, tanto nas áreas adjacentes aos cursos d'água quanto ao longo de suas vertentes, promove alterações significativas no balanço hídrico local, especialmente no que diz respeito ao escoamento superficial e ao regime de vazões. Tendo em vista que urbanização aumenta o escoamento superficial e diminui a infiltração do solo logo a probabilidade de enchentes dentro do território da bacia fica mais atenuante.

Em relação aos Rios, lagos e oceanos é possível salientar uma leve redução da sua faixa territorial (1,81 % em 1988 para 1,77% em 2024), podendo estar ligado ao crescimento antrópico que altera as características físicas do terreno possibilitando o fenômeno do assoreamento. Em sua pesquisa Santos (2016) explica que urbanização em bacias hidrográficas irá refletir no escoamento superficial, devido a impermeabilização do solo, e que isso desencadeia outros impactos onde promove maior poder erosivo sobre as áreas de solo exposto ocasionando o assoreamento dos rios.

Na Figura 2 é possível observar de forma visual as mudanças da dinâmica do uso da terra na BHRGO. Entre 1988 – 1996 é apresentado o início da conversão da floresta (cor verde) para a utilização da área para a pastagem (cor amarela), no início é possível observar um cenário que indica uma paisagem majoritariamente natural com baixa interferência antrópica, percebe-se que rede hidrográfica continua preservada sem grandes pressões antrópicas e as áreas em amarelo (pastagem) são mais fragmentadas, entretanto mesmo até 1996 já começa a ser perceptível a expansão da pecuária como o maior vetor da mudança da dinâmica do uso da terra.

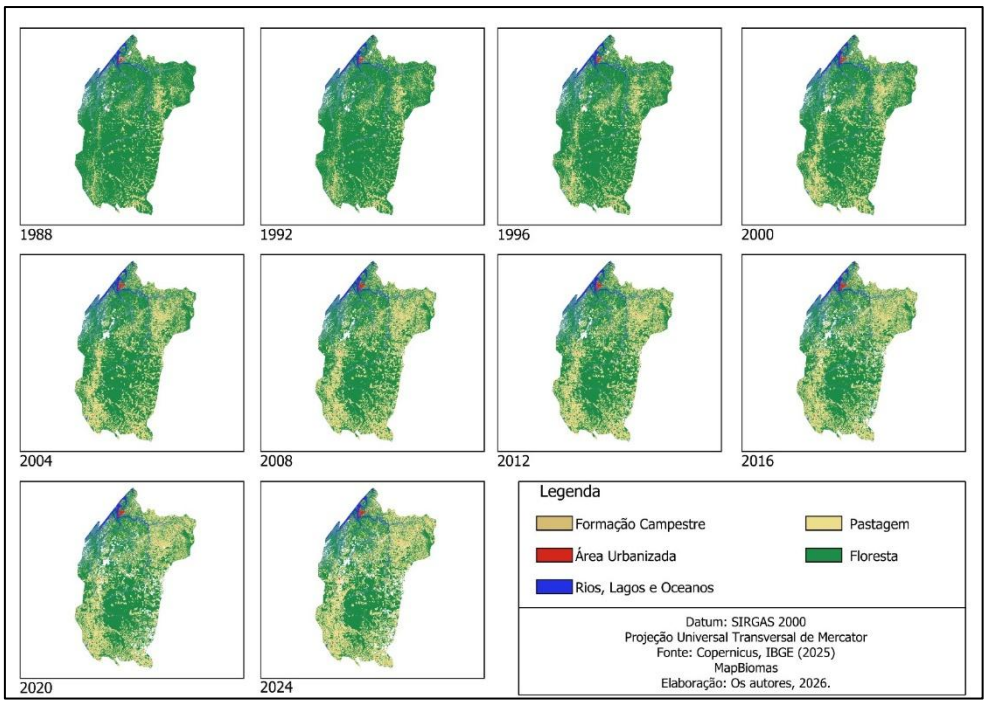


Figura 02: Evolução do uso e ocupação do solo na sub-bacia do Rio Guamá (1988-2024)
Fonte: Os autores (2026).

De 2000 a 2012 a agropecuária se consolida como a classe de crescimento contínuo demonstrando sua ocupação acontecendo pelas extremidades nordeste e sudoeste da região estudada, as florestas se concentram em áreas mais isoladas e as áreas urbanizadas (cor vermelha) ainda se apresentam com um crescimento discreto no noroeste da Bacia próximo as porções de água. Já no período de 2016 a 2024 é perceptível um crescimento pontual das áreas urbanizadas, mesmo que seja de forma isolada, isso indica que boa parte da cobertura do solo passa a ser impermeabilizada com isso podendo ocorrer picos de cheia dentro da bacia. De acordo com Benini (2015), às alterações de drenagem em uma bacia hidrográfica são causadas pela urbanização desordenada, esse fenômeno pode facilitar a ocorrência de enchentes e deslizamentos, ocasionando riscos à saúde e à vida humana. Além disso, a pastagem ocupa majoritariamente o território ocasionando a perda expansiva da cobertura vegetal, também intensifica os picos de cheia na bacia, fazendo com que os impactos ambientais se tornem cumulativos ao longo dos anos.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram com os achados de Rocha e Lima (2020), que também identificaram a expansão das atividades agropecuárias como principal fator de pressão sobre a BHRGO. De forma semelhante, estudos na Amazônia Oriental têm apontado a substituição de cobertura florestal por pastagens como um dos principais motores de alteração do regime hidrológico e da qualidade ambiental das bacias hidrográficas. Assim, o padrão observado insere-se em uma tendência regional de transformação da paisagem associada à expansão antrópica.

Comentários finais

A análise multitemporal do uso e ocupação da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Guamá e Outros, no período de 1988 a 2024, evidencia um processo contínuo de transformação antrópica da paisagem, caracterizado principalmente pela expansão da agropecuária e, em menor proporção, pelo crescimento das áreas urbanizadas. A expressiva redução da cobertura florestal, associada ao aumento significativo das áreas de pastagem, revela uma mudança estrutural no padrão de uso da terra, consolidando a atividade agropecuária como principal vetor de pressão ambiental na região. Esse comportamento reforça tendências já observadas em estudos na Amazônia Oriental, indicando um padrão recorrente de substituição da vegetação nativa por usos.

Diante desse cenário, torna-se fundamental o fortalecimento de políticas públicas voltadas à gestão integrada dos recursos hídricos, com ênfase na conservação da cobertura vegetal remanescente, na proteção das Áreas de Preservação Permanente e na promoção de práticas sustentáveis de uso da terra. Nesse contexto, o uso contínuo de ferramentas de monitoramento, como o sensoriamento remoto, aliado ao desenvolvimento de estudos ao longo do tempo que considerem também fatores climáticos e hidrológicos, pode contribuir para decisões mais conscientes e eficazes. Além disso, é essencial a atuação conjunta entre poder público, comunidade científica e sociedade, fortalecendo a governança ambiental e promovendo estratégias de planejamento mais eficientes.

Adicionalmente, a recuperação de áreas degradadas e o incentivo a práticas produtivas mais sustentáveis podem auxiliar na redução dos impactos já observados na bacia, contribuindo para o equilíbrio entre uso econômico e conservação ambiental. Dessa forma, torna-se possível compreender melhor a dinâmica da BHRGO e orientar ações que garantam não apenas a preservação ambiental, mas também a manutenção da qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos na região amazônica a longo prazo.

Agradecimentos

Agradecimento especial ao Programa de Educação Tutorial - Secretaria de Educação Superior MEC, PET Engenharia Sanitária e Ambiental, pelo apoio financeiro (Bolsas).

Referências Bibliográficas

BARBOSA JR., Antenor Rodrigues. Elementos de Hidrologia Aplicada – **Conceitos de Bacia Hidrográfica.** 1º Edição. São Paulo: Blucher, 2022.

BARBOSA, I. C. da C., SOUSA, A. M. L. de, SILVA, E. R. M. da, SILVA, H. J. F. da, VITORINO, M. I., & Costa, L. G. da S. (2020). **Variáveis físico-geográficas e as implicações sobre vulnerabilidade ambiental na Sub-Bacia do Rio Guamá, Pará, Brasil.** Revista Ibero-Americana De Ciências Ambientais, 11(3), 264–291. https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.003.0022

BENINI, Rubens de Miranda; MEDIONDO, Eduardo Mario. **Urbanização e Impactos no Ciclo Hidrológico na Bacia do Mineirinho.** Floresta Ambiente. 22 (2), Abr-Jun 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1590/2179-8087.103114 Acesso em: 21/02/2026.

MAURANO, Luís Eduardo P.; ESCADA, **Maria Isabel Sobral. Comparação dos dados produzidos pelo PRODES versus dados do MapBiomas para o bioma Amazônia.** Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, v. 19, p. 735-738, 2019.

NETO, Mário Diniz de Araújo; STEINKE, Valdir Adilson; PINTO, Maria Ligia Cassol. **Crescimento urbano em bacias hidrográficas: impasses e perspectivas relativos à sustentabilidade social.** Qualidade e Sustentabilidade do Ambiente Construído Legislação, Gestão Pública e Projetos. Brasilia, 2014. Disponível em: 305683048_Crescimento_urbano_em_bacias_hidrograficas_impasses_e_perspectivas_relativos_a_sustentabilidade_social. Acesso em: 21/01/2026

PALMEIRA, T. S.; SARAIVA, M. C.; MIRANDA, L. C. **Geoprocessamento aplicado na análise do uso e ocupação do solo no extremo noroeste da Bacia Hidrográfica do Guamá.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Geoprocessamento) – Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2022.

PARÁ. Conselho Estadual de Recursos Hídricos (Pará). **Resolução nº 04, de 03 de setembro de 2008. Dispõe sobre a divisão hidrográfica do Estado do Pará**. Belém, 2008.

ROCHA, Nívia Cristina Vieira; LIMA, Aline Maria Meiguins de. **A sustentabilidade hídrica na bacia do Rio Guamá, Amazônia Oriental/Brasil.** Soc. nat. 32, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-45694 Acesso em: 21/02/2026

SANTOS, Caio Lima; SOUZA, Alexandre dos Santos; VITAL, Saulo Roberto de Oliveira; DA SILVA, Osvaldo Girão; WARDERLEI, Lucas Suassuna de Alburquerque. **Impactos da urbanização em bacias hidrográficas: o caso da bacia do Rio Jaguaribe, cidade de João Pessoa/PB.** REGNE,Vol. 2. Nº Especial. 2016 Disponível em: https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/10565/7482 Acesso em: 21/02/2026.

SILVA, A. A. S.; PESSOA, F. C. L.; FERREIRA, R. S.; ATAIDE, L. C. P. **Nível de comprometimento, disponibilidade hídrica e principais usos consuntivos na Sub-Região Hidrográfica Guamá, nordeste do Pará.** Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales, v. 17, n. 1, p. 175–190, 2024. DOI: 10.22201/iingen.0718378xe.17.1.84537.

MUDANÇAS NO USO DA TERRA E PRESSÕES AMBIENTAIS: UMA ABORDAGEM ESPAÇO-TEMPORAL COM DADOS DO MAPBIOMAS NA REGIÃO DE SÃO CARLOS (SP)

Arthur de Oliveira Campos e Jacqueline Zanin Lima
Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP),
e-mail:arthurcamposgeo@usp.br; jacqueline.zanin.lima@usp.br

Palavras-chave: Dinâmica espacial; Expansão urbana; Planejamento territorial.

Resumo

A análise do uso e ocupação do solo constitui uma ferramenta fundamental para compreender as transformações ambientais e territoriais decorrentes da ação antrópica, especialmente em contextos urbanos em expansão. Este estudo tem como foco a dinâmica espaço-temporal do município de São Carlos (SP), utilizando dados da plataforma MapBiomas para os anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2024. A partir da classificação das principais classes de uso e cobertura da terra, são identificados padrões de crescimento, transições entre classes e suas implicações ambientais, sociais e hidrológicas. A expansão urbana e agropecuária, associada à supressão de vegetação nativa, evidencia um processo de transformação da paisagem que intensifica a impermeabilização do solo, altera o ciclo hidrológico e amplia a vulnerabilidade a eventos extremos, como inundações. Além disso, o estudo discute o papel da população como agente ativo nesse processo, tanto na intensificação das pressões sobre os recursos naturais quanto na potencial mitigação dos impactos por meio de práticas sustentáveis e participação no planejamento territorial. Conclui-se que a identificação das tendências de crescimento e a compreensão dos vetores de mudança oferecem subsídios estratégicos para o planejamento urbano e ambiental, contribuindo para a formulação de diretrizes alinhadas aos princípios da sustentabilidade.

Introdução

A análise do uso e ocupação do solo constitui um elemento central para a compreensão das transformações ambientais contemporâneas, sobretudo em contextos marcados pela intensificação da ação antrópica e pelas mudanças climáticas. Embora frequentemente utilizados como sinônimos, os termos apresentam distinções conceituais importantes: o uso do solo refere-se à função atribuída a determinada área (como agricultura, urbanização ou conservação), enquanto a ocupação do solo diz respeito à forma física como essa área é efetivamente apropriada e estruturada no espaço, incluindo aspectos como densidade urbana, padrão construtivo e cobertura vegetal. Essa distinção é fundamental para análises críticas, pois permite compreender não apenas o que se faz com o território, mas também como esse uso se materializa e impacta os sistemas naturais, especialmente no contexto de expansão urbana, mudanças na cobertura da terra e seus efeitos ambientais (CHE; GUO; DENG, 2025; HINOJOSA-CONTRERAS et al., 2026; STANGANINI; LOLLO, 2018; MENDES; MENDIONDO, 2007).

No Brasil, dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) indicam que a expansão das áreas agropecuárias e urbanas nas últimas décadas tem ocorrido de forma acelerada, frequentemente à custa da supressão de vegetação nativa, conforme evidenciado nos levantamentos sistemáticos de uso da terra no país (IBGE, 2022). Esse processo reflete um modelo de desenvolvimento territorial baseado na conversão de ecossistemas naturais em superfícies produtivas ou impermeáveis, gerando profundas alterações na paisagem e nos fluxos ambientais. Iniciativas como o MapBiomas permitem evidenciar essas transformações, classificando o território em categorias como “Floresta”, “Formação Natural Não Florestal” (vegetação herbácea e arbustiva), “Agropecuária”, “Área Não Vegetada” e “Corpos d’água”, o que possibilita análises multitemporais e integradas.

Ao longo dos anos, essas transformações configuram um processo de reorganização da paisagem natural, no qual sistemas originalmente contínuos e equilibrados são substituídos por mosaicos fragmentados e altamente heterogêneos. Métricas espaciais evidenciam esse fenômeno por meio do aumento do número de fragmentos (*patches*) e da densidade de bordas, indicando perda de conectividade ecológica e maior vulnerabilidade ambiental (CHE; GUO; DENG, 2025). Esse padrão é particularmente evidente em processos de espraiamento urbano (*urban sprawl*), nos quais o crescimento horizontal disperso consome áreas agrícolas e naturais, gerando pressões adicionais sobre os recursos naturais.

A conversão dessas classes ao longo do tempo está diretamente associada a mudanças nos processos hidrológicos, geomorfológicos e ecológicos. A substituição de áreas florestais por usos agropecuários ou urbanos, por exemplo, implica a redução da interceptação da chuva, diminuição da infiltração e aumento do escoamento superficial, resultando em maior suscetibilidade a processos erosivos, assoreamento de cursos d’água e intensificação de inundações (FU et al., 2017; REHMAN; KHAN, 2022). Estudos demonstram que a urbanização desordenada, especialmente em países em desenvolvimento, é um dos principais vetores dessas alterações, promovendo a impermeabilização do solo e a fragmentação da paisagem (HINOJOSA-CONTRERAS et al., 2026).

Nesse contexto, a pressão sobre o solo manifesta-se por meio da compactação, perda de estrutura e redução da fertilidade, especialmente em áreas de pastagem intensiva e agricultura mecanizada. Sobre os recursos hídricos, observa-se a redução da recarga de aquíferos, aumento do escoamento superficial e degradação da qualidade da água devido ao transporte de sedimentos e poluentes. Já a cobertura vegetal sofre com a supressão e fragmentação, comprometendo serviços ecossistêmicos essenciais, como regulação climática, proteção do solo e manutenção da biodiversidade (WANG et al., 2024).

A expansão da monocultura desempenha papel particularmente relevante nesse processo. Sistemas agrícolas homogêneos, como grandes áreas de soja ou cana-de-açúcar, tendem a simplificar a paisagem, reduzindo a diversidade ecológica e aumentando a vulnerabilidade a pragas, erosão e degradação do solo. Além disso, a monocultura promove ciclos de uso intensivo que alteram significativamente as propriedades físico-hídricas do solo, dificultando sua recuperação e comprometendo a sustentabilidade a longo prazo (FU et al., 2017). A supressão de florestas e vegetação herbácea agrava ainda mais esse cenário. As florestas desempenham papel crucial na estabilidade dos sistemas naturais, atuando como reguladoras do ciclo hidrológico e como elementos de proteção contra processos erosivos e movimentos de massa. Já as formações herbáceas, embora menos densas, contribuem para a proteção superficial do solo. Sua remoção expõe o terreno à ação direta das chuvas, intensificando processos de degradação (REHMAN; KHAN, 2022).

Considerando que as transformações do uso e ocupação do solo em São Carlos (SP) estão diretamente associadas à ação antrópica e à ocupação de áreas ambientalmente sensíveis, este estudo tem como objetivo geral analisar a dinâmica espaço-temporal do uso e cobertura da terra no período de 1985 a 2024, buscando compreender como esses processos se relacionam com os condicionantes físicos do meio. Especificamente, pretende-se: (i) identificar os padrões de expansão urbana e agropecuária ao longo do período analisado, com base em dados da plataforma MapBiomas; (ii) correlacionar essas mudanças com os atributos do meio físico, representados pelos mapas litológicos, pedológicos e de declividade, de modo a avaliar como as características geológicas, os tipos de solo e as classes de relevo influenciam a ocupação do território; (iii) analisar a ocorrência de ocupação em áreas potencialmente vulneráveis, como encostas, fundos de vale e zonas com materiais geotecnicamente menos favoráveis; e (iv) discutir, de forma integrada, as implicações dessas dinâmicas para os processos hidrológicos, a degradação ambiental e a geração de riscos.

Em síntese, a definição desses objetivos permite estruturar uma abordagem integrada para a análise da dinâmica de uso e ocupação do solo em São Carlos (SP), articulando a evolução temporal da paisagem com os condicionantes físicos do meio, representados pela litologia, pedologia e declividade. Essa perspectiva possibilita não apenas compreender os padrões de transformação territorial, mas também identificar incompatibilidades entre a ocupação antrópica e a aptidão natural do terreno, evidenciando áreas mais suscetíveis a processos de degradação e riscos geotécnicos. Dessa forma, o estudo se consolida como um instrumento técnico-científico relevante para subsidiar o planejamento urbano e ambiental, contribuindo para a adoção de estratégias mais sustentáveis, resilientes e alinhadas às características naturais da região.

Nessa perspectiva, este estudo busca oferecer subsídios para o planejamento urbano e ambiental, alinhados aos princípios da sustentabilidade e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 11, ao evidenciar a necessidade de cidades mais resilientes e planejadas; o ODS 13, ao destacar as implicações das mudanças no uso da terra sobre o ciclo do carbono e a regulação climática; o ODS 15, ao reforçar a urgência da conservação dos ecossistemas terrestres frente à supressão da cobertura vegetal; e o ODS 6, ao considerar os impactos diretos sobre a disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos.

Área de Estudo

O município de São Carlos, localizado no Estado de São Paulo (Figura 01), possui aproximadamente 1.140 km² de extensão territorial e população superior a 250 mil habitantes, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), destacando-se como um importante polo tecnológico, universitário e de serviços. Inserido no Planalto Ocidental Paulista, apresenta relevo predominantemente suave a ondulado, com colinas amplas e vales encaixados, condicionando a ocupação urbana e a dinâmica de drenagem.

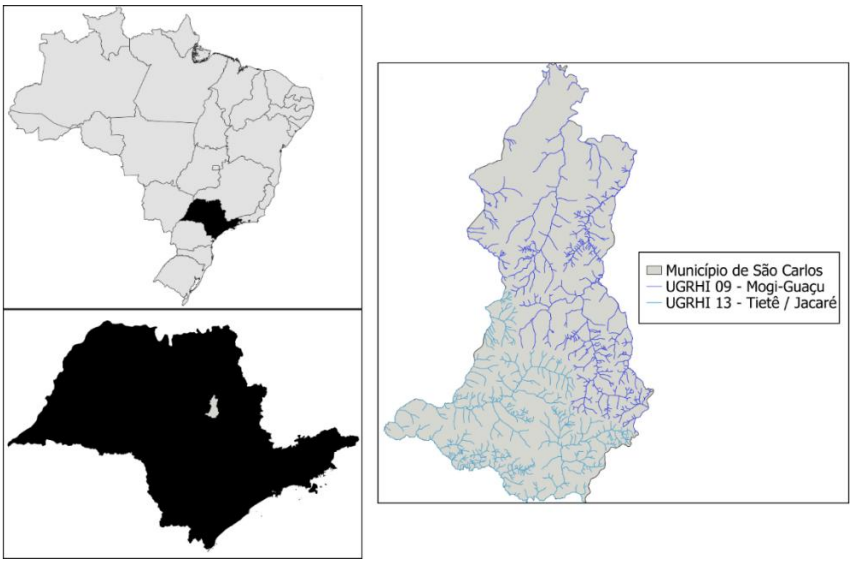


Figura 01: Mapa de localização de São Carlos com a delimitação das UGRHIs.

Do ponto de vista hidrográfico, o município está inserido em duas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHIs): a do Tietê-Jacaré (UGRHI 13) e a do Mogi-Guaçu (UGRHI 09), sendo que a área urbana se concentra na primeira,

o que contribui para uma rede de drenagem sensível às mudanças no uso do solo, especialmente sob clima tropical de altitude com chuvas intensas no verão, favorecendo processos de escoamento superficial, erosão e assoreamento (MENDES; MENDIONDO, 2007; STANGANINI; LOLLO, 2018).

No que se refere à base geológica, a Figura 02A (mapa litológico) evidencia a distribuição das principais unidades que compõem o substrato de São Carlos (SP), refletindo a evolução da Bacia do Paraná e sua influência direta no comportamento geotécnico dos materiais. Destacam-se os depósitos aluvionares e colúvio-eluvionares, associados a fundos de vale e encostas, compostos por materiais inconsolidados de baixa resistência, altamente suscetíveis à erosão e instabilidade, sobretudo quando submetidos à urbanização (NISHIYAMA, 1991). As formações areníticas Botucatu e Piramboia apresentam elevada permeabilidade, favorecendo a infiltração e a recarga hídrica, condição positiva para estratégias de drenagem sustentável, embora também impliquem maior vulnerabilidade à erosão superficial quando expostas (FAILACHE et al., 2022). Em contraste, a Formação Corumbataí, constituída por materiais mais argilosos, apresenta menor permeabilidade e maior plasticidade, podendo resultar em problemas associados à expansão e retração. Já os derrames basálticos da Formação Serra Geral conferem maior resistência ao substrato, contribuindo para maior estabilidade do relevo, ainda que os solos derivados apresentem comportamento variável em função do grau de intemperismo (ROSSI, 2017).

A partir dessa base litológica e de processos de redistribuição no relevo, desenvolve-se uma diversidade de solos residuais e retrabalhados, cuja distribuição é apresentada na Figura 02B (mapa pedológico), desempenhando papel central na dinâmica de uso e ocupação do solo. Predominam Latossolos profundos, bem drenados e altamente intemperizados, que favorecem a infiltração e apresentam boa estabilidade estrutural, embora possam sofrer degradação sob compactação e remoção da cobertura vegetal (ROSSI, 2017). Os Argissolos, com horizonte B textural, tendem a restringir a infiltração em profundidade, favorecendo o escoamento superficial e a erosão. Os Nitossolos apresentam melhor estrutura e maior coesão, sendo relativamente mais estáveis do ponto de vista geotécnico. Por outro lado, os Neossolos, rasos e pouco desenvolvidos, especialmente em áreas mais inclinadas, apresentam limitações quanto à capacidade de suporte e maior suscetibilidade à erosão. Em áreas de fundo de vale, a presença de Gleissolos e Organossolos indica condições de saturação hídrica, baixa resistência e alta compressibilidade, configurando restrições importantes à ocupação urbana.

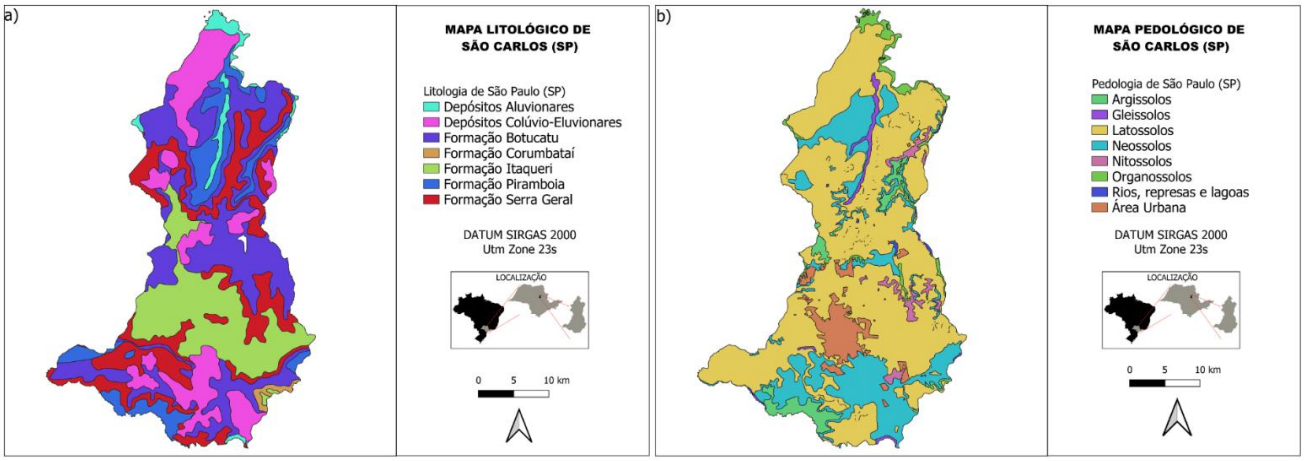


Figura 02: Variação espacial de atributos físicos em São Carlos: a) Litologia e b) Pedologia.

Material e Métodos

Os dados utilizados neste estudo, suas respectivas fontes e anos de referência estão sintetizados na Tabela 01, a qual também indica, de forma sistematizada, a natureza das informações empregadas na análise.

Tabela 01: Síntese dos dados utilizados, fontes e aplicações na pesquisa.

Tipo de dado	Fonte	Ano	Aplicação na pesquisa
Litologia	PERROTTA et al. (Mapa Geológico do Estado de São Paulo)	2006	Caracterização geológica e suporte à interpretação geotécnica
Pedologia	ROSSI (Mapa pedológico do Estado de São Paulo)	2017	Avaliação da aptidão e limitações dos solos
Declividade	SRTM[1] (Modelo Digital de Elevação)	2026	Geração de mapa de declividade e análise do relevo
Uso e cobertura do solo	MapBiomas	Dados multitemporais[2]	Análise multitemporal, identificação de classes e dinâmicas de uso

[1]SRTM: *Shuttle Radar Topography Mission*; [2]Dados multitemporais (1985–2024), sendo 2024 o ano mais recente.

Os dados litológicos, pedológicos e de relevo foram processados no *software* QGIS (versão 3.44), incluindo etapas de recorte, padronização, classificação e geração de mapas primários e secundários (Figuras 01 e 02).

O Modelo Digital de Elevação (MDE) foi obtido a partir de dados do SRTM, servindo como base para a análise do relevo. A partir desse modelo, foi gerado o raster de declividade por meio de técnicas de processamento em ambiente SIG. Posteriormente, o mapa de declividade foi reclassificado utilizando uma tabela de intervalos, permitindo a transformação dos valores contínuos em classes discretas. Por fim, essas classes foram nomeadas de acordo com a classificação de relevo proposta pela Embrapa (2025), possibilitando a categorização em diferentes tipos de relevo, como plano, suavemente ondulado e ondulado.

A análise do uso e ocupação do solo no município de São Carlos foi desenvolvida a partir dos dados da plataforma MapBiomas, em formato GeoTIFF, referentes aos anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2024. O processamento em ambiente SIG iniciou-se com a reclassificação e padronização das camadas originais. As informações foram consolidadas em cinco classes principais: "Floresta", "Formação Natural Não Florestal", "Agropecuária", "Área não Vegetada" e "Corpos d'água", com o objetivo de simplificar a análise e destacar as categorias mais representativas. Essa simplificação permitiu realizar análises multitemporais focadas na identificação de padrões de expansão urbana, retração da cobertura vegetal e transições entre classes, evidenciando a evolução da ocupação do território ao longo das últimas décadas.

Posteriormente, esses dados multitemporais de uso e ocupação do solo foram integrados às informações do meio físico e condicionantes geotécnicos por meio de técnicas de sobreposição espacial (*overlay*). Esta abordagem permitiu avaliar como as características físicas influenciam a dinâmica de ocupação, evidenciando as potencialidades e as restrições ambientais da área de estudo frente à pressão urbana e agropecuária.

Resultados e Discussão

O relevo do município de São Carlos constitui um dos principais condicionantes naturais da dinâmica de uso e ocupação do solo, exercendo influência direta sobre a expansão urbana, a distribuição das atividades antrópicas e os processos geotécnicos associados. A Figura 02 (mapa de declividade) permite compreender a variação do relevo na área de estudo. De acordo com a classificação da Embrapa (2025), o relevo é classificado segundo valores de declividade em cinco categorias: plano (0–3%), suave ondulado (3–8%), ondulado (8–20%), forte ondulado (20–45%) e montanhoso (>45%). Observa-se que São Carlos apresenta predominância de relevo suave ondulado a ondulado, com setores localizados de maior declividade associados a vertentes mais dissecadas.

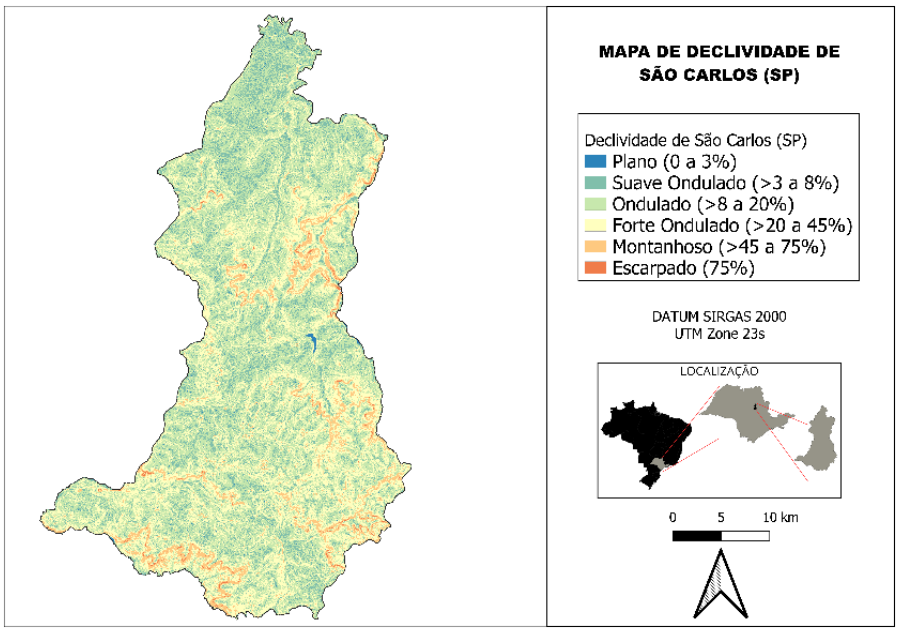


Figura 02: Variação espacial de declividade em São Carlos (SP).

Do ponto de vista da declividade, a compartimentação do relevo no município de São Carlos (SP) revela um predomínio expressivo de formas onduladas a fortemente onduladas, que, em conjunto, correspondem a mais de 78% do território (44,94% e 33,38%, respectivamente), conforme apresentado na Tabela 02. As áreas de relevo suave ondulado também possuem participação relevante (14,84%), enquanto os terrenos planos (0,31%), montanhosos (6,09%) e escarpados (0,42%) apresentam menor representatividade espacial. Áreas com baixa declividade tendem a favorecer a ocupação urbana e a infiltração, embora sejam frequentemente alvo de intensa impermeabilização. Em contrapartida, áreas com maiores declividades, sobretudo quando associadas a solos pouco desenvolvidos, apresentam maior suscetibilidade a processos erosivos, instabilidades e movimentos de massa, exigindo maior controle no uso e ocupação. Essa distribuição evidencia que, embora existam setores favoráveis à ocupação do ponto de vista geomorfológico, grande parte do território apresenta restrições moderadas a elevadas, exigindo maior controle técnico no uso e ocupação do solo.

Tabela 02: Distribuição das classes de declividade de São Carlos (SP).

Classe (Embrapa, 2025)	Área (km²)	(%)
Plano (0 a 3%)	3,59	0,31
Suave ondulado (>3 a 8%)	169,18	14,84
Ondulado (>8 a 20%)	512,40	44,94
Forte ondulado (>20 a 45%)	380,60	33,38
Montanhoso (>45 a 75%)	69,47	6,09
Escarpado (>75%)	4,76	0,42

Complementarmente, a análise multitemporal do uso e cobertura da terra (Figura 03), abrangendo os anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2024, revela que a ocupação inicial, embora fosse relativamente compatível com o meio físico, evoluiu para um padrão progressivamente mais crítico e menos aderente às limitações naturais do terreno.

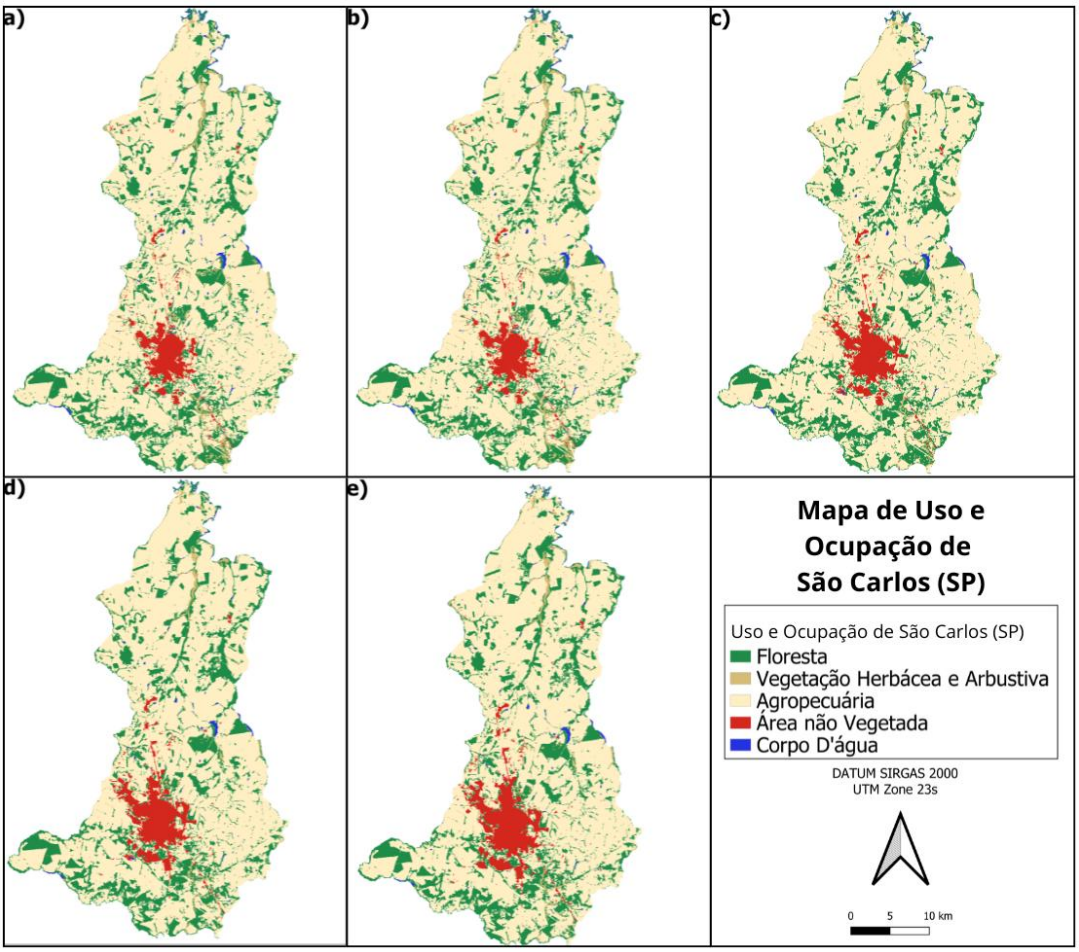


Figura 03: Evolução espacial e temporal do uso e cobertura da terra em São Carlos, considerando os anos de 1985 (a), 1995 (b), 2005 (c), 2015 (d) e 2024 (e).

A síntese quantitativa dessa evolução, apresentada na Tabela 03, evidencia uma transformação significativa da paisagem, marcada pelo avanço contínuo das áreas não vegetadas, majoritariamente áreas urbanas, que praticamente dobraram no período (de 35,8 km² para 74,1 km²), e pela redução expressiva da vegetação herbácea e arbustiva (de 39,0 km² para 21,1 km²). As áreas florestais mantiveram relativa estabilidade em termos quantitativos (entre aproximadamente 20% e 23%), enquanto a agropecuária permaneceu como uso dominante, ocupando mais de 74% do território ao longo de toda a série histórica, ainda que com discreta retração recente, indicando a conversão progressiva dessas áreas para usos urbanos.

Tabela 03: Área (em km²) das 5 classes observadas e a evolução para o período entre 1985 e 2024.

Ano	Agropecuária		Floresta		Vegetação Herbácea/Arbustiva		Área Não Vegetada		Corpo d'água		Não Observado	
	km²	%	km²	%	km²	%	km²	%	km²	%	km²	%
1985	847,6	74,35	265,6	23,3	39	3,42	35,8	3,14	6,9	0,61	2,5	0,21
1995	879,4	77,14	232,8	20,4	31,3	2,74	43,9	3,85	7,5	0,66	2,5	0,21
2005	863,7	75,77	243,2	21,3	24,3	2,13	57,6	5,05	6,1	0,53	2,5	0,21
2015	856	75,08	246,3	21,6	21,5	1,88	65,9	5,78	5,3	0,47	2,5	0,21
2024	850,6	74,61	243,7	21,4	21,1	1,85	74,1	6,5	5,5	0,48	2,5	0,21

A análise integrada do uso e ocupação do solo no município de São Carlos (Figura 03 e Tabela 03), associada aos condicionantes físicos de litologia (Figura 01A), pedologia (Figura 01B) e declividade (Figura 02 e Tabela 02), permite observar, de forma robusta e crítica, que a dinâmica territorial entre 1985 e 2024 foi fortemente estruturada por uma lógica de ocupação seletiva, orientada pela facilidade de uso imediato do terreno, e não por sua adequação geotécnica e ambiental de longo prazo. Esse padrão de transformação territorial responde diretamente aos objetivos do trabalho ao demonstrar que a expansão urbana ocorreu preferencialmente sobre áreas de relevo plano a suave ondulado, anteriormente ocupadas por atividades agropecuárias e associadas a solos profundos e bem drenados, como os Latossolos. Tal padrão reflete uma convergência entre viabilidade técnica e econômica, mas revela um paradoxo relevante: as áreas mais aptas sob o ponto de vista agrícola e hidrológico foram justamente as mais intensamente impermeabilizadas, comprometendo funções ecossistêmicas essenciais, como infiltração, recarga hídrica e regulação térmica. Nesse contexto, a ocupação não apenas altera o uso do solo, mas reconfigura o funcionamento do sistema hidrológico e geotécnico.

Do ponto de vista litológico, as formações sedimentares da Bacia do Paraná, especialmente os arenitos das formações Botucatu e Piramboia, desempenharam papel central na orientação da ocupação territorial, favorecendo tanto a expansão agrícola quanto urbana devido à sua elevada permeabilidade e facilidade de escavação. No entanto, essas mesmas características implicam maior suscetibilidade à erosão e à degradação estrutural quando associadas à remoção da cobertura vegetal e à impermeabilização. Em contraste, as formações basálticas da Serra Geral, mais resistentes e associadas a relevos mais acidentados, atuaram como limitantes naturais à ocupação, contribuindo para a preservação relativa de fragmentos vegetais, ainda que essa preservação decorra mais de restrições físicas do que de planejamento territorial efetivo.

A pedologia reforça esse quadro ao evidenciar que os solos predominantes foram intensamente utilizados sem a devida consideração de suas limitações sob condições antrópicas. Embora Latossolos e Nitossolos apresentem boa estrutura e elevada capacidade de infiltração em condições naturais, sua funcionalidade é rapidamente comprometida quando submetidos à compactação e ao selamento superficial. Em áreas com Argissolos e Neossolos, especialmente associadas a maiores declividades, a ocupação antrópica pode potencializar processos erosivos mais severos, como ravinamento e formação de voçorocas. Já os Gleissolos, devido à saturação hídrica, permanecem como áreas naturalmente restritivas à ocupação, mas altamente sensíveis a intervenções inadequadas.

A declividade se confirma como o principal fator de controle espacial da ocupação, funcionando como um filtro geomorfológico ao longo do período analisado. Observa-se que, na década inicial (1985–1995), a expansão urbana se concentrou majoritariamente em áreas de relevo plano a suave ondulado, acompanhando a lógica de menor custo de implantação e maior estabilidade geotécnica. Portanto, as áreas planas e suavemente onduladas concentraram a maior parte das atividades antrópicas, enquanto setores mais inclinados permaneceram, em grande medida, sob cobertura vegetal. Contudo, a partir dos anos 2000, especialmente entre 2005 e 2024, verifica-se uma inflexão nesse padrão, com o avanço da ocupação sobre áreas mais heterogêneas do ponto de vista geomorfológico, incluindo setores com maiores declividades e proximidades de fundos de vale. Contudo, observa-se uma tendência recente de avanço da ocupação sobre áreas com maiores declividades, indicando uma transição para um modelo de expansão mais pressionado, no qual as limitações naturais passam a ser progressivamente superadas por intervenções técnicas, frequentemente associadas a maiores custos e riscos geotécnicos. A ocupação de áreas com maior declividade, anteriormente evitadas, aumenta a suscetibilidade a instabilidades de taludes, sobretudo quando associada a cortes e aterros mal dimensionados e à ausência de sistemas adequados de drenagem. Essa transição, embora espacialmente gradual, representa uma mudança qualitativa importante: o crescimento urbano deixa de ser condicionado prioritariamente pela aptidão natural e passa a responder a pressões antrópicas, como valorização fundiária e expansão periférica desordenada. Esse cenário indica que o relevo, embora ainda atue como condicionante, tem sua influência progressivamente mitigada por intervenções antrópicas que nem sempre são acompanhadas por soluções técnicas compatíveis com a complexidade do meio físico.

Sob uma perspectiva crítica, os resultados evidenciam que o modelo de desenvolvimento territorial adotado apresenta sinais consistentes de insustentabilidade. A combinação entre a manutenção de extensas áreas sob uso agropecuário intensivo, a

expansão urbana horizontal e a redução de coberturas vegetais intermediárias resultam em um sistema territorial altamente pressionado. Esse processo intensifica a impermeabilização do solo, aumenta o escoamento superficial e contribui para a ocorrência de enchentes, inundações, alagamentos, erosão e assoreamento de corpos d'água, além de comprometer a resiliência ambiental frente a eventos climáticos extremos.

Com o avanço da área urbana, a substituição de superfícies naturais por áreas impermeáveis, especialmente em terrenos ondulados e fortemente ondulados, intensifica o escoamento superficial e reduz significativamente a infiltração, alterando o balanço hídrico local. Esse processo é potencializado pela ocupação de encostas e zonas de transição geomorfológica, onde a interação entre declividade acentuada, modificações na cobertura do solo e concentração de fluxos hídricos favorece o desenvolvimento de processos erosivos. Além disso, a ocupação de fundos de vale, frequentemente associada à retificação e canalização de cursos d'água, contribui para o aumento da velocidade do escoamento superficial, elevando os riscos de eventos hidrológicos, como enchentes, inundações e alagamentos, além de promover a degradação progressiva dos sistemas fluviais.

Dessa forma, pode-se constatar que a principal contribuição deste trabalho reside na demonstração de que a compreensão integrada entre uso e ocupação do solo e os condicionantes físicos é fundamental para o planejamento territorial. A ausência dessa integração tem conduzido a um padrão de ocupação que desconsidera as limitações naturais do meio, transformando-as progressivamente em riscos e passivos ambientais. Nesse sentido, o caso de São Carlos ilustra um padrão recorrente em cidades brasileiras de médio porte, no qual o crescimento urbano ocorre de forma desarticulada do suporte físico, comprometendo não apenas a sustentabilidade ambiental, mas também a segurança geotécnica e a viabilidade do desenvolvimento futuro.

Considerações finais

Em São Carlos (SP), a dinâmica de uso e ocupação do solo evidencia, de forma consistente, a predominância de decisões territoriais orientadas por critérios de viabilidade imediata, sobretudo facilidade construtiva e baixo custo de implantação em detrimento de uma análise integrada das limitações impostas pelo meio físico. A leitura multitemporal dos dados, aliada à interpretação dos condicionantes geomorfológicos, litológicos e pedológicos, revela que a expansão urbana ocorreu inicialmente em áreas mais aptas, porém evoluiu para um padrão progressivamente mais intensivo e tecnicamente mais exigente, avançando sobre setores com maior complexidade ambiental. Esse processo não apenas simplifica a paisagem ao reduzir a heterogeneidade de coberturas e funções ecológicas, mas também promove uma reorganização funcional do território, marcada pela substituição de sistemas naturais resilientes por superfícies impermeáveis e artificializadas, com consequências diretas sobre o balanço hídrico e a estabilidade geotécnica.

Do ponto de vista sistêmico, essa transformação implica a ruptura de equilíbrios fundamentais entre solo, água e relevo. A conversão de áreas com elevada capacidade de infiltração, como aquelas dominadas por Latossolos em relevo suave, em superfícies urbanizadas, resulta na redução da recarga hídrica e no aumento do escoamento superficial, intensificando processos como erosão linear, assoreamento de cursos d'água e ocorrência de eventos de inundação. Paralelamente, a ocupação de áreas com maior declividade e menor estabilidade natural, associadas a solos mais suscetíveis (como Argissolos e Neossolos), amplia significativamente os riscos geotécnicos, sobretudo em cenários de eventos pluviométricos intensos. Esse quadro é agravado pela ausência, ou insuficiência, de soluções de engenharia compatíveis com a complexidade do meio físico, evidenciando uma lacuna entre o conhecimento técnico disponível e sua aplicação efetiva no ordenamento territorial.

Sob uma perspectiva crítica e prospectiva, os resultados indicam que o modelo de ocupação vigente tende a aprofundar a insustentabilidade do sistema territorial, caso não haja uma mudança estrutural na forma como o planejamento urbano incorpora os condicionantes naturais. A manutenção de um padrão de expansão horizontal, aliada à redução de coberturas vegetais intermediárias e à fragmentação de áreas naturais, compromete não apenas os serviços ecossistêmicos, mas também a resiliência do território frente às mudanças climáticas e aos eventos extremos. Assim, torna-se evidente que a ausência de integração entre planejamento urbano e base físico-natural não é apenas uma limitação técnica, mas um fator estruturante de risco, capaz de transformar condicionantes naturais em passivos ambientais e socioeconômicos. Nesse sentido, a compreensão integrada entre uso do solo, relevo, litologia e pedologia deve deixar de ser apenas um instrumento analítico e passar a constituir um eixo central na tomada de decisão, sob pena de perpetuar um modelo de ocupação que, embora funcional no curto prazo, se mostra progressivamente inviável em escalas temporais mais amplas.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de pesquisa (processo nº 132420), que possibilitou a realização deste estudo.

Referências Bibliográficas

CHE, L.; GUO, S.; DENG, Y. Land use evolution and prediction: a bibliometric review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 22, p. 11077–11090, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s13762-024-05983-0.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 6. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: EMBRAPA, 2025. 393 p. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1176834. Acesso em: 8 abr. 2026.

FAILACHE, M.; PONS, N.; PEJON, O.; ZUQUETTE, L. Suitability zoning for sustainable drainage systems (SuDSs): application in a basin in southern Brazil. *Sustainability*, v. 14, n. 5, p. 2577, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/su14052577.

FU, B.; WU, M.; CHE, Y.; YANG, K. Effects of land-use changes on city-level net carbon emissions based on a coupled model. *Carbon Management*, v. 8, n. 3, p. 245–262, 2017. DOI: https://doi.org/10.1080/17583004.2017.1314704.

HINOJOSA-CONTRERAS, R.; CANTARINO, I.; GIELEN, E.; PALENCIA-JIMÉNEZ, J.-S. Urban sprawl in Latin America: a systematic review of the existing literature and emerging insights. *Land Use Policy*, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2026.107980.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Cidades e estados: São Carlos (SP)*. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

MENDES, Heloisa Ceccato; MENDIONDO, Eduardo Mário. *Histórico da expansão urbana e incidência de inundações: o caso da bacia do Gregório, São Carlos – SP*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 17–27, jan./mar. 2007. DOI: http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v12n1.p17-27.

NISHIYAMA, L. *Mapeamento geotécnico preliminar da quadrícula de São Carlos - SP*. 1991. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991. DOI: https://doi.org/10.11606/D.18.1991.tde-20240523-095813.

PERROTTA, M. M. et al. *Mapa geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT); Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2006. Escala 1:750.000.

REHMAN, F.; KHAN, A. Environmental impacts of urbanization encroachment in the lowlands of Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Sustainability*, v. 14, n. 19, p. 11959, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/su141911959.

ROSSI, M. *Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado*. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. v. 1. 118 p.

STANGANINI, Fernanda Nogueira; LOLLO, José Augusto de. *O crescimento da área urbana da cidade de São Carlos/SP entre os anos de 2010 e 2015: o avanço da degradação ambiental*. urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, Curitiba, v. 10, supl. 1, p. 118–128, 2018. DOI: https://doi.org/10.1590/2175-3369.010.SUPL1.AO14.

WANG, C.; LI, M.; WANG, X.; DENG, M.; WU, Y.; HONG, W. Spatio-temporal dynamics of carbon storage in rapidly urbanizing Shenzhen, China: insights and predictions. *Land*, v. 13, p. 1566, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/land13101566.

MODELAGEM PREDITIVA DA DINÂMICA DE USO E COBERTURA DA TERRA NA BACIA DO RIO TEJIPIÓ, PERNAMBUCO, BRASIL

1 Fabricio David Simplicio Aniceto, 2 Pâmela Vitória da Silva, 3 Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral
1 Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, e-mail: fabricio.david@ufpe.br; 2 Instituto Federal de Pernambuco, Brasil, e-mail: pvs@discente.ifpe.edu.br; 3 Universidade de Pernambuco e Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, e-mail: jaime.cabral@ufpe.br

Palavras-chave: Cenários Futuros; Crescimento Urbano; MOLUSCE.

Resumo

A dinâmica de uso e cobertura da terra tem se consolidado como um dos principais componentes das mudanças ambientais, especialmente em áreas vulneráveis sujeitas às pressões antrópicas. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo modelar a dinâmica espaço-temporal de uso e cobertura da terra na bacia do rio Tejipió, em Pernambuco, projetando cenários futuros para os anos de 2030 e 2040. A metodologia foi baseada na utilização de dados do MapBiomas entre 2000 e 2020, aliada à aplicação de um modelo de regressão logística no plugin MOLUSCE, integrado ao software QGIS. Cinco critérios – modelo digital de terreno, declividade, distância de rios, distância de estradas e distância de áreas urbanas – foram empregados como variáveis espaciais na modelagem, para representar suas influências nas transições de uso e cobertura da terra. A validação do modelo foi realizada por meio de métricas estatísticas, apresentando desempenho satisfatório, com Kappa geral de 0,832 e acurácia de 90,51%. Os resultados indicaram uma tendência de expansão urbana ao longo do período analisado, acompanhada pelo aumento da cobertura florestal, associado a políticas de conservação. Em contrapartida, observou-se a redução de áreas de pastagem, manguezais e corpos hídricos, evidenciando conflitos entre urbanização e preservação ambiental. Os cenários projetados reforçam a necessidade de políticas públicas voltadas à resiliência urbana, destacando a adoção de Soluções Baseadas na Natureza como estratégia para mitigar os efeitos da urbanização e fortalecer a segurança socioambiental na bacia.

Introdução

A cobertura terrestre constitui um recurso natural indispensável, desempenhando funções biofísicas, sociais e econômicas fundamentais para o desenvolvimento das sociedades (Hailu; Mammo; Kidane, 2020). No entanto, as modificações no uso e cobertura da terra têm se consolidado como um dos principais componentes das mudanças ambientais globais, visto que refletem diretamente a intensidade das intervenções antrópicas sobre a superfície terrestre (Rodrigues et al., 2025). Conforme destacado por Rodrigues et al. (2025), em escala global, a dinâmica dessas transformações foi impulsionada pelo crescimento populacional e pela urbanização, resultando em impactos significativos sobre os ciclos hidrológicos, a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos.

No contexto brasileiro, o processo de urbanização intensificou-se a partir da segunda metade do século XX, ocorrendo, em muitos casos, de maneira rápida e desordenada (Pessoa Neto; Silva; Barbosa, 2023). A Região Metropolitana do Recife (RMR), em particular, é amplamente reconhecida como uma região de vulnerabilidade climática, figurando entre as áreas mais suscetíveis aos impactos das mudanças ambientais globais (Farias et al., 2024). De acordo com Arruda Filho e Jacobi (2025), esse cenário é agravado pela expansão urbana desorganizada e pelo aumento de superfícies impermeáveis, fatores que intensificam a ocorrência de inundações e elevam o risco de deslizamentos de encostas. Dessa forma, o monitoramento e a predição das dinâmicas de uso e cobertura da terra são essenciais para estabelecer estratégias de mitigação dos impactos.

A bacia do rio Tejipió, localizada integralmente na RMR, no estado de Pernambuco, é um exemplo crítico dessa dinâmica de transformação. Caracterizada por baixas altitudes e baixas declividades em sua região costeira, a bacia enfrenta intensas alterações decorrentes da expansão urbana, que constitui mais de 60,0% de sua área (Pessoa Neto; Silva; Barbosa, 2023). Intervenções antrópicas, como a supressão de vegetação nativa e o aumento de áreas impermeáveis, têm contribuído para o aumento do escoamento superficial e para a redução da capacidade de infiltração do solo na bacia (Aniceto et al., 2025), agravando os eventos de inundação recorrentes que colocam em risco a vida da população.

O monitoramento e a compreensão das dinâmicas de uso e cobertura da terra são, portanto, fundamentais para a gestão de desastres e para o ordenamento territorial (Baghel et al., 2024). Nesse sentido, a integração de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas tem se consolidado como uma abordagem adequada para analisar as transformações históricas e projetar os cenários futuros (Amgoth; Rani; Jayakumar, 2023). Entre as ferramentas disponíveis, o plugin Modules for Land Use Change Evaluation (MOLUSCE), operado em ambiente QGIS, destaca-se por sua capacidade de avaliar mudanças recentes e simular cenários futuros de uso da terra, permitindo a identificação de padrões espaciais e a antecipação de incertezas associadas ao crescimento das cidades (Muhammad et al., 2022).

O MOLUSCE incorpora diferentes algoritmos de aprendizado de máquina amplamente reconhecidos, como Redes Neurais Artificiais, Avaliação Multicritério, Pesos de Evidências e Regressão Logística (Kamaraj; Rangarajan, 2022). Dentre esses, a Regressão Logística se destaca por possibilitar a análise das relações quantitativas entre as mudanças da terra e seus fatores condicionantes, facilitando a distinção entre as variáveis que efetivamente impulsionam a expansão urbana (Arsanjani et al., 2013). Além disso, devido à sua capacidade de integrar variáveis espaciais complexas, esse modelo probabilístico contribui para a precisão das modelagens de transformação territorial.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo modelar a dinâmica espaço-temporal de uso e cobertura da terra na bacia do rio Tejipió, na Região Metropolitana do Recife, projetando cenários futuros para 2030 e 2040 com o uso do plugin MOLUSCE integrado ao algoritmo de Regressão Logística. Com isso, espera-se que o estudo contribua para a identificação de padrões e áreas potenciais de expansão urbana, fornecendo subsídios ao ordenamento territorial e à implementação de estratégias de mitigação de riscos ambientais nas próximas décadas.

Material e Métodos

O presente estudo foi desenvolvido na bacia hidrográfica do rio Tejipió, localizada na região Nordeste do Brasil, abrangendo os municípios de Jaboatão dos Guararapes, São Lourenço da Mata e Recife, no estado de Pernambuco (Figura 01). A bacia apresenta uma área de drenagem de 93,3 km² e integra a Região Metropolitana do Recife, caracterizada por elevada densidade populacional (Santos et al., 2024). A região da bacia apresenta altitude de 1,6 metros na planície fluvial próxima à foz do rio, variando até 123,2 metros nos morros localizados a oeste. A vegetação local é característica do bioma Mata Atlântica e, segundo Silva (2019), a maior parte da bacia (67,00%) encontra-se na cidade do Recife, seguida de Jaboatão dos Guararapes (27,00%) e São Lourenço da Mata (6,00%).

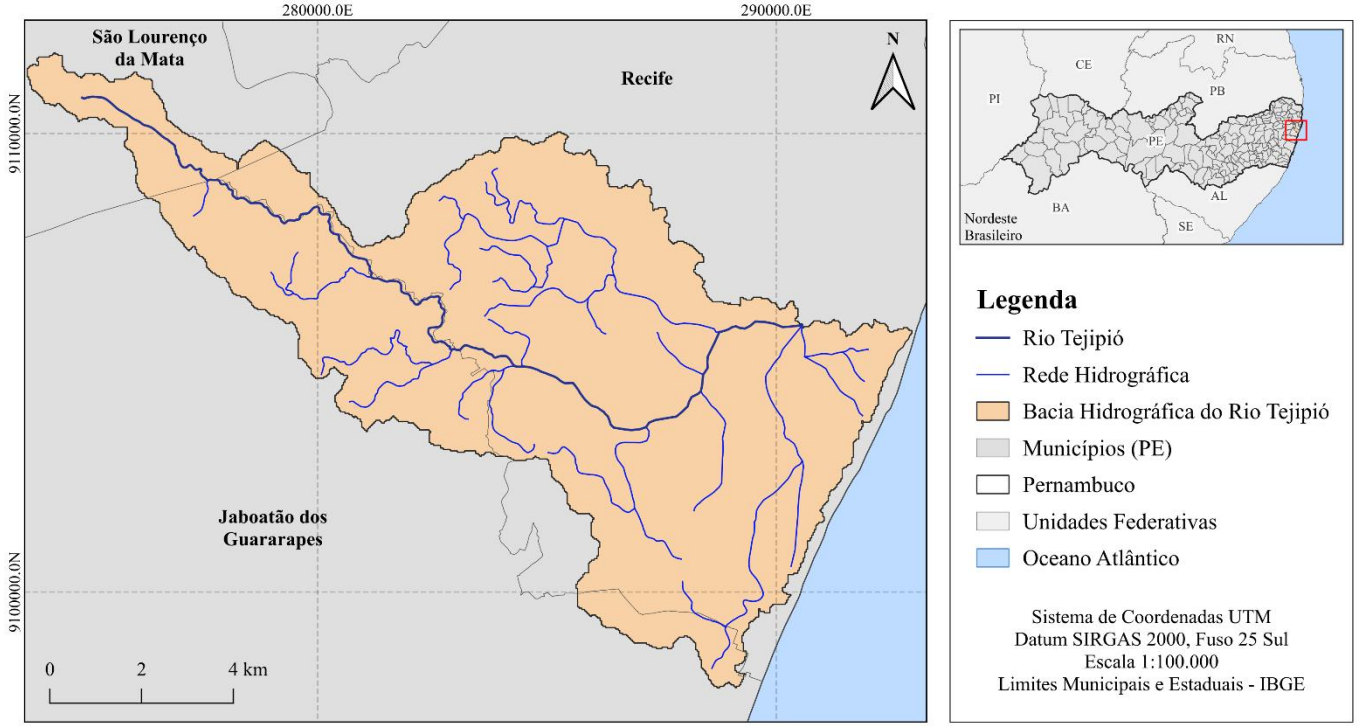


Figura 01: Mapa de localização da bacia do rio Tejipió.
Fonte: Autores (2026)

Conforme a Agência Pernambucana de Águas e Clima (2023), a área de estudo apresenta clima tropical chuvoso com verão seco, classificado como As, com temperatura média anual de 26 ºC e precipitação média anual de aproximadamente 2.175 mm. A bacia do rio Tejipió apresenta uma densa rede hidrográfica, com extensão aproximada de 90 km, destacando-se como principais afluentes o rio Jiquiá, o riacho Mussaíba, o rio Jordão e o riacho São Leopoldo (Silva, 2019). Devido às características naturais da região, como a baixa topografia, a influência das marés e o lençol freático raso, os processos de drenagem são insuficientes (Rodrigues et al., 2025), principalmente nos períodos de chuvas intensas. A combinação desses fatores resulta na formação de áreas mais suscetíveis às inundações nas áreas urbanas, que impactam, em especial, as populações mais vulneráveis (Silva et al., 2025).

Nesse contexto, o plugin Modules for Land Use Change Simulations, integrado ao software livre QGIS 3.40, foi empregado para projetar mudanças nas classes de uso e cobertura da terra. O MOLUSCE permite estimar potenciais mudanças de uso e cobertura da terra por meio de uma matriz de probabilidade espacial e algoritmos de aprendizado de máquina (Kamaraj; Rangarajan, 2022). Assim, o plugin possibilita a modelagem de cenários futuros integrando dados históricos, probabilidades de transição e fatores espaciais (Rodrigues et al., 2025).

Neste estudo, o modelo utilizou imagens de entrada referentes aos anos de 2000 e 2010, provenientes da plataforma MapBiomas (2026), uma iniciativa que disponibiliza um conjunto de dados espaciais de uso e cobertura da terra do território brasileiro a partir da classificação pixel a pixel de imagens dos satélites Landsat, com resolução espacial de 30 metros (Viana et al., 2023). Por meio da integração de imagens temporais, algoritmos de aprendizado de máquina e pontos de amostragem para validação (Souza Junior et al., 2020), os mapas gerados permitem o monitoramento das mudanças ambientais ao longo do tempo.

De forma complementar, conforme ilustra a Figura 02, foram utilizadas variáveis espaciais relacionadas à composição da bacia do rio Tejipió, incluindo Modelo Digital de Terreno (MDT), declividade (DEC), distância de rios (DRI), distância de áreas urbanas (DAU) e distância de estradas (DRU). Esses fatores são amplamente aplicados em estudos similares devido à sua influência direta nas mudanças de uso e cobertura da terra (Kamaraj; Rangarajan, 2022). O MDT foi obtido a partir do produto CopernicusDEM (ESA, 2024), sendo a declividade e a hidrografia derivadas desse modelo. Os traçados viários foram provenientes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022), enquanto a área urbana foi extraída dos dados do MapBiomas. A ferramenta de distância euclidiana, principal forma de realizar análises espaciais (Amgoth; Rani; Jayakumar, 2023), foi aplicada no QGIS para a obtenção das distâncias em relação a rios, estradas e áreas urbanas. Todas variáveis explicativas foram convertidas para o formato raster, com resolução espacial de 30 metros.

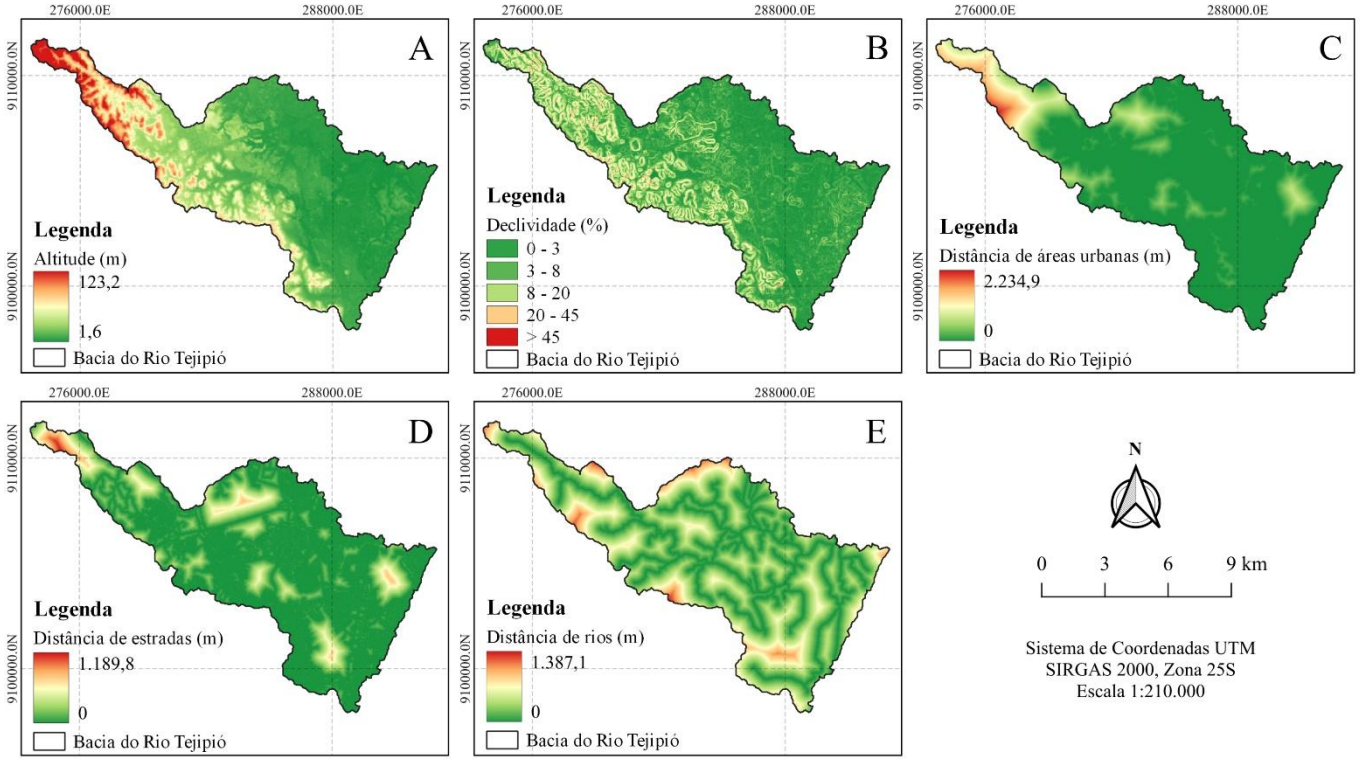


Figura 02: Variáveis explicativas da área de estudo: A) Modelo Digital de Terreno; B) Declividade; C) Distância de áreas urbanas; D) Distância de estradas; E) Distância de rios.
Fonte: Autores (2026).

No MOLUSCE, o método de regressão logística foi aplicado para simular as transições de uso e cobertura da terra, considerando as imagens históricas e as variáveis preditoras previamente definidas. A regressão logística é amplamente utilizada na modelagem preditiva do uso da terra, pois permite identificar relações empíricas entre uma variável dependente binária e múltiplas variáveis independentes, sejam elas categóricas ou contínuas (Arsanjani et al., 2013). Nesse contexto, a projeção inicial foi direcionada ao ano de 2020, sendo a acurácia do modelo avaliada por meio da comparação entre o mapa simulado e o mapa de referência de uso e cobertura da terra disponibilizado pelo MapBiomas para o mesmo ano.

A projeção foi validada por meio de cinco métricas estatísticas calculadas no módulo de validação do MOLUSCE, sendo: Correlação de Pearson; Kappa (K) geral; K histograma; K posição; e Porcentagem de Correção. O coeficiente Kappa, que varia entre 0 e 1, é utilizado para quantificar o grau de concordância entre mapas simulados e de referência (Rodrigues et al., 2025). Valores próximos de 1 representam alta concordância, enquanto valores próximos de 0 indicam baixa concordância (Hailu; Mammo; Kidane, 2020). A partir de resultados de validação satisfatórios, os cenários futuros de uso e cobertura da terra foram simulados para os anos de 2030 e 2040.

Resultados e Discussão

A análise de correlação entre as variáveis (Figura 03), baseada no coeficiente de Pearson (r), permitiu avaliar o grau de associação linear entre os fatores. Com isso, foram verificadas correlações fortes ($r \geq 0,60$) entre MDT e AUR, MDT e DEC, bem como entre DRU e AUR. As demais variáveis apresentaram correlações fracas a moderadas, demonstrando baixa dependência linear entre os fatores (Gao et al., 2023). De modo geral, os resultados indicam ausência de correlações extremas ($r \geq 0,80$), que sugerem baixa ocorrência de multicolinearidade entre os dados espaciais, condição que pode comprometer a confiabilidade dos coeficientes em modelos de regressão (Ankah et al., 2025).

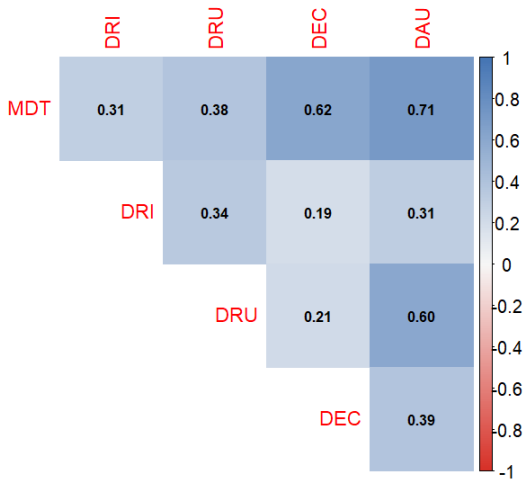


Figura 03: Matriz de correlação entre as variáveis explicativas utilizadas na modelagem: MDT – Modelo Digital de Terreno; DRI – Distância de Rios; DRU – Distância de Ruas; DEC – Declividade; DAU – Distância de Áreas Urbanas. Fonte: Autores (2026).

Como não foram identificadas correlações extremas entre as variáveis, todas foram mantidas para a simulação, uma vez que não apresentam indícios de multicolinearidade. Nesse contexto, a validação do modelo de predição indicou desempenho satisfatório entre os dados observados e simulados para o ano de 2020, com Percentual de Correção de 90,51%, Kappa geral de 0,832, Kappa do histograma de 0,977 e Kappa de posição de 0,852. Esses resultados demonstram que o modelo de regressão logística apresenta elevada capacidade de reproduzir os padrões espaciais de uso e cobertura da terra (Arsanjani et al., 2013), sendo confiável para análise e projeção das dinâmicas na área de estudo, conforme ilustrado na Figura 04.

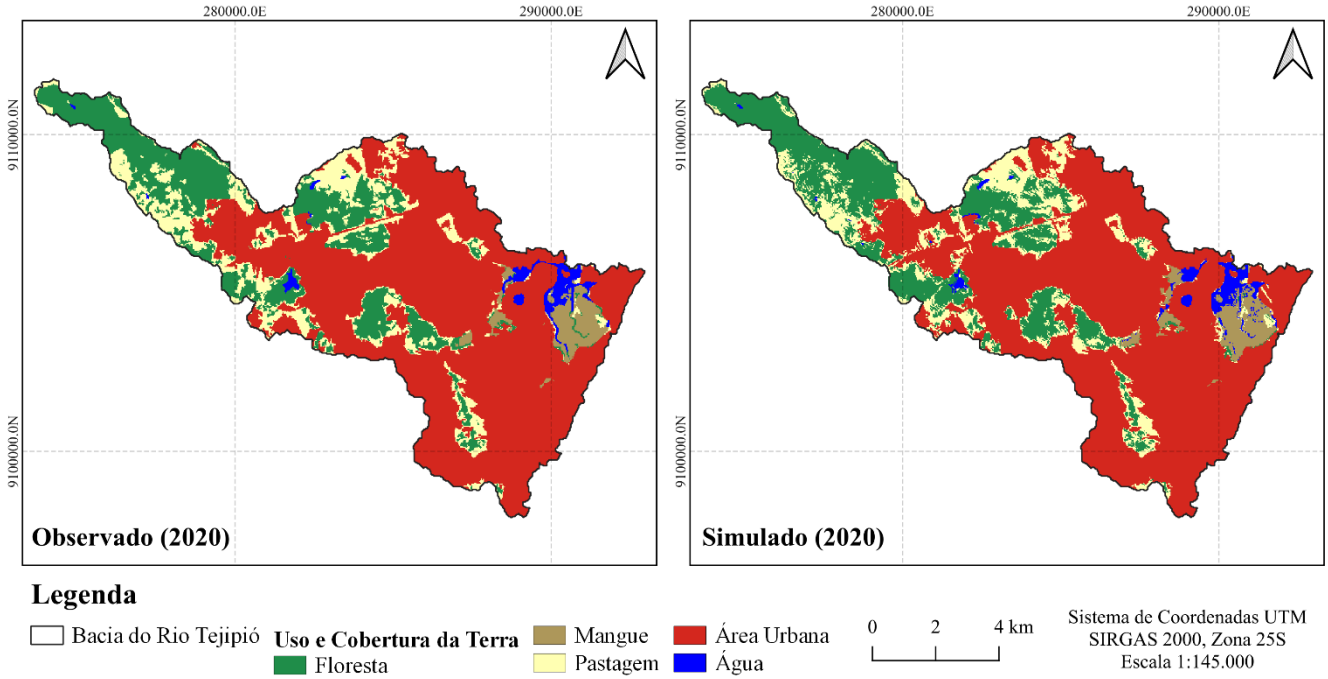


Figura 04: Mapas de uso e cobertura da terra da bacia do rio Tejipió em 2020 nos cenários observado e simulado. Fonte: Autores (2026).

Diante disso, os dados observados de uso e cobertura da terra entre 2000 e 2020 revelam a expansão evidente das áreas de floresta, exibindo um aumento de 25,97% no período mencionado. Apesar das constantes pressões antrópicas sobre a bacia, esse aumento da cobertura florestal é reflexo, em grande parcela, das ações de governança municipal de Recife com a instituição de Unidades de Conservação em seu território, que têm desempenhado um papel fundamental na preservação e restauração de áreas verdes (Rodrigues et al., 2025). Além disso, é possível notar a regeneração natural de vegetação nas proximidades da nascente do rio Tejipió. As projeções para 2040 demonstram uma expansão substancial de 8,52% para as áreas de floresta em relação a 2020, resultando, principalmente, na conversão de áreas de pastagem em coberturas florestais. A Figura 05 apresenta essas dinâmicas para a bacia do rio Tejipió.

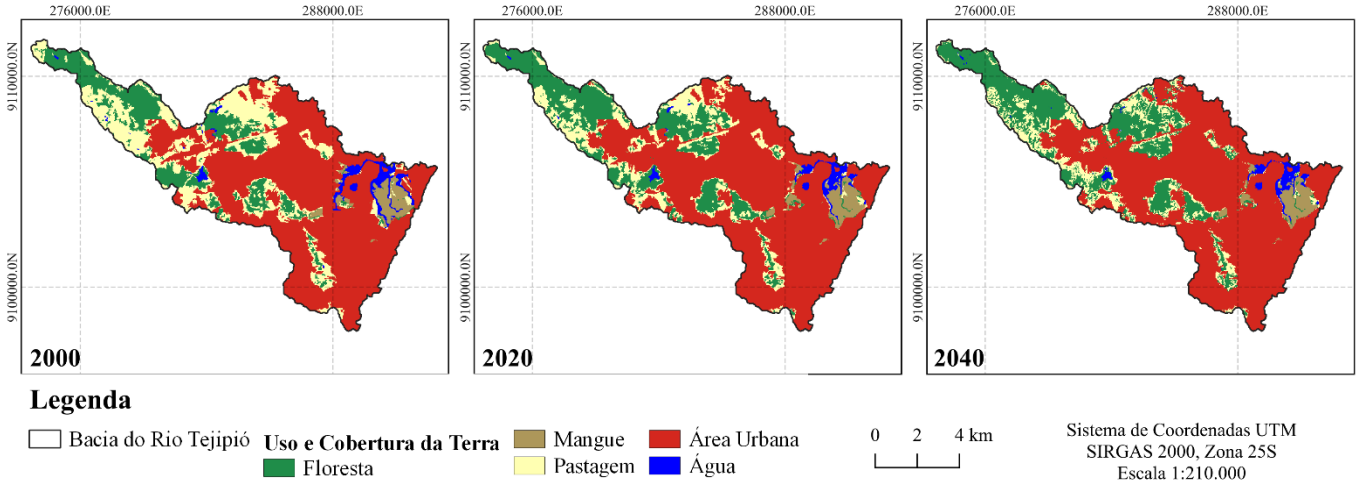


Figura 05: Mudanças de uso e cobertura da terra na bacia do rio Tejipió entre 2000 e 2040.
Fonte: Autores (2026).

Em contraste, as áreas de pastagem apresentaram declínio progressivo entre 2000 e 2020. A diminuição de 33,04% nesse período é atribuída, em grande parcela, à sua substituição pela cobertura florestal e pela expansão urbana. Para 2040, foi observado que as áreas de pastagem tendem a continuar diminuindo, atingindo uma perda de área de 15,56% em relação ao ano de 2020. De forma complementar, as áreas de mangue apresentaram variação mínima (0,34%) entre 2000 e 2020; no entanto, as projeções para 2040 demonstram uma queda substancial (6,14%) dessa classe, que pode ser atribuída à substituição do manguezal pela expansão urbana, impulsionada, entre outros fatores, pela invasão do ecossistema para construções irregulares (Silva, 2019).

Em 2000, as áreas de corpos d'água ocupavam 2,54 km² do território da bacia (2,72%); no entanto, ocorreu uma perda de área de 29,53% até o ano de 2020. Esse cenário ocorreu devido à conversão de corpos hídricos em ambientes construídos, que ocorre muitas vezes de maneira irregular às margens de rios e riachos, e ressalta a necessidade de maior investimento em políticas públicas voltadas à fiscalização ambiental e ao ordenamento territorial (Baghel et al., 2024). Em 2040, as áreas de corpos d'água podem diminuir em 1,68% em comparação à 2020. As áreas urbanas ocupavam grande parte do território da bacia desde 2000 e, como consequência das pressões demográficas, entre 2000 e 2020 foi notado um aumento de 6,46% na área urbana. Observa-se que as áreas urbanizadas podem aumentar em 1,25% até o ano de 2040.

O diagrama de Sankey (Figura 06) corrobora as mudanças de uso e cobertura da terra observadas na Figura 05, representando as transições entre as classes ao longo do período analisado. Com isso, é possível observar claramente a expansão das áreas de cobertura florestal entre 2000 e 2040, conforme indicado pela conversão de outras classes, especialmente de pastagens. Destaca-se ainda o aumento gradativo das áreas urbanas, que foi a classe mais dominante em 2000 e tende a continuar em expansão até 2040.

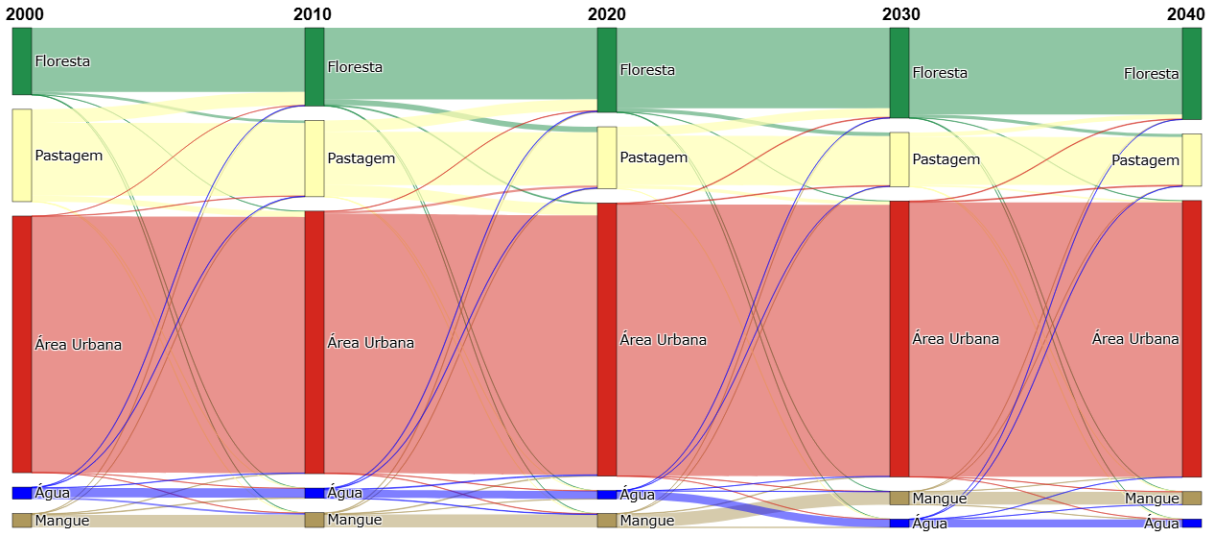


Figura 06: Diagrama de Sankey ilustrando as transições de classes de uso e cobertura da terra entre 2000 e 2040.
Fonte: Autores (2026).

De forma complementar, a Tabela 01 corrobora os padrões espaço-temporais observados na expansão de áreas florestais e urbanas, na redução de áreas de pastagem e no equilíbrio entre os corpos d'água e os manguezais. A estabilização da cobertura

florestal a partir de 2030 sugere a influência de políticas de conservação ou a disponibilidade limitada de áreas convertíveis para novas alterações no uso e cobertura da terra. Apesar da expansão das áreas de cobertura florestal, a área urbana é a classe mais representativa durante todo o período analisado. Essas condições provocam intensos impactos ambientais associados à urbanização descontrolada na bacia do rio Tejipió, incluindo as ocupações inapropriadas das populações ribeirinhas, a contaminação em função das ligações clandestinas de esgoto, o descarte irregular de resíduos sólidos e o assoreamento do leito do rio (Freitas Filho; Cabral, 2012).

Classe	2000 (km²)	2010 (km²)	2020 (km²)	2030 (km²)	2040 (km²)
Floresta	14,17	16,51	17,85	19,06	19,37
Mangue	2,92	3,09	2,93	2,81	2,75
Pastagem	19,49	16,11	13,05	11,41	11,02
Área Urbana	54,16	55,40	57,66	58,25	58,38
Água	2,54	2,17	1,79	1,75	1,76

Tabela 01: Variação espaço-temporal de uso e cobertura da terra entre 2000 e 2040 na bacia do rio Tejipió. Fonte: Autores (2026).

De acordo com Rodrigues et al. (2025), esse avanço da urbanização, especialmente no município de Recife, é impulsionado devido à expansão econômica e à pressão demográfica. Assim, essa expansão gradativa de áreas impermeáveis também afeta a capacidade do solo em fornecer serviços ecossistêmicos, como retenção e infiltração das águas pluviais (Hanna; Bruno; Comín, 2024), e contribui para a intensificação dos eventos de inundação na bacia, principalmente quando as chuvas intensas são associadas aos picos de maré alta (Silva, 2019).

A compreensão dos processos de inundação na bacia do rio Tejipió pode ser aprofundada a partir da socio-hidrologia, campo que investiga o acoplamento bidirecional e a coevolução entre sociedade e água (Sivapalan; Savenije; Blöschl, 2012). Diante do histórico de urbanização desordenada, marcado pela impermeabilização do solo e pela ocupação de áreas naturais de amortecimento de cheias (Silva, 2019), essa abordagem permite analisar de que forma as interações entre aspectos físicos e sociais influenciam a intensidade dos desastres naturais (Vanelli, 2023). Nesse cenário, a integração entre o conhecimento científico e a percepção de risco das populações vulneráveis é fundamental para promover uma gestão de riscos mais participativa e multidisciplinar (Kobiyama; Goerl; Monteiro, 2018).

Nesse contexto de adaptação, as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) surgem como estratégias resilientes que integram infraestrutura urbana a funções ecológicas, oferecendo alternativas eficazes para a mitigação de inundações urbanas (Ferreira et al., 2022). Entre os exemplos práticos, destacam-se os parques inundáveis ou alagáveis, projetados para atuar como bacias de retenção durante chuvas intensas e como áreas de lazer em períodos secos (Muñoz et al., 2024). Às margens do rio Tejipió, essas estratégias já estão sendo implementadas pela Prefeitura do Recife, com a implantação do Parque Alagável Campo do Barro, no bairro do Barro, e do Parque Alagável do Tejipió, entre os bairros de Areias e Ipsep. Em continuidade a essa iniciativa, foi anunciada a construção de um novo parque no bairro do Barro, com o objetivo de ampliar a retenção de águas e reduzir os alagamentos em vias e áreas residenciais (Gomes, 2026).

A efetividade dessas intervenções e do planejamento territorial para as próximas décadas depende da incorporação da abordagem socio-hidrológica, promovendo a conexão entre o conhecimento acadêmico e os atores locais. Assim, a atuação do Fórum Popular do Rio Tejipió (FORTE) exemplifica esse engajamento ao mobilizar a comunidade na defesa do rio e na reivindicação de políticas integradas de revitalização para toda a bacia (FORTE, 2025). Ao articular a modelagem preditiva de uso e cobertura da terra com a participação social ativa, é possível estabelecer um modelo de gestão capaz não apenas de antecipar cenários futuros, mas também de fortalecer a resiliência urbana e a segurança socioambiental das populações da bacia do rio Tejipió.

Considerações Finais

Este estudo demonstrou a aplicabilidade do plugin MOLUSCE, integrado à regressão logística, na modelagem das mudanças de uso e cobertura da terra na bacia do rio Tejipió, apresentando elevado desempenho preditivo (Kappa = 0,832 e acurácia de 90,51%). Os resultados evidenciam uma tendência de expansão urbana, acompanhada pelo aumento da cobertura florestal, associada tanto às pressões antrópicas quanto às políticas de conservação. Em contrapartida, observa-se a redução de áreas de pastagem, manguezais e corpos hídricos, evidenciando os conflitos entre o desenvolvimento urbano e a preservação ambiental. As projeções para 2030 e 2040 reforçam esses cenários, indicando maior impermeabilização do solo e, consequentemente, intensificação dos impactos sobre os processos hidrológicos.

Diante disso, o estudo contribui para a detecção das mudanças de uso e cobertura na terra, bem como para a projeção dos padrões futuros de ocupação. Com isso, os resultados fornecem subsídios para gestores públicos na formulação de políticas públicas que fortaleçam o planejamento territorial resiliente, com destaque para a adoção de Soluções Baseadas na Natureza. Cabe ressaltar que, embora o modelo apresente bom desempenho, suas limitações quanto à ausência de variáveis institucionais e sociais devem ser consideradas, sendo mais adequado como ferramenta de apoio à tomada de decisão. Assim, estudos futuros podem avançar na incorporação dessas variáveis, bem como na integração da modelagem de uso e cobertura da terra com modelos hidrológicos, ampliando a compreensão dos impactos decorrentes das mudanças na bacia.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco e à Universidade Federal de Pernambuco pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ANICETO, F. D. S.; SILVA, P. V.; MENESES, E. A.; PAZ, D. H. F.; CABRAL, J. J. S. P. Estimativa do potencial de escoamento sob diferentes condições de uso e cobertura do solo na bacia do rio Tejipió, Recife-PE. *In*: Congresso Iberoamericano de Sistemas de Abastecimento de Água, Drenagem e Irrigação, 18., 2025, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: UFPB, 2025.

ANKAH, M. L. Y.; FRIMPONG, R. A.; ODUM, E. K.; METEN, M.; KLU, A. K. Landslide susceptibility mapping using GIS-based logistic regression model in Sekondi- Takoradi Metropolitan Area of Ghana. **Discover Applied Sciences**, v. 7, e1009, 2025. DOI: 10.1007/s42452-025-07147-2.

AMGOTH, A.; RANI, H. P.; JAYAKUMAR, K.V. Exploring LULC changes in Pakhal Lake area, Telangana, India using QGIS MOLUSCE plugin. **Spatial Information Research**, [*s. l.*], v. 31, p. 429-438, 2023. DOI: 10.1007/s41324-023-00509-1.

APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Atlas climatológico do estado de Pernambuco**: normais climatológicas 1991-2020. Recife: APAC, 2023. 148 p.

ARRUDA FILHO, M. T.; JACOBI, P. R. Análise histórica da justiça climática em Recife, Pernambuco: trajetória e vulnerabilidade socioambiental. **Revista Cadernos de Campo**, Araraquara, v. 25, n. 2, e025020, 2025. DOI: 10.47284/cdc.v25iesp2.20059.

ARSANJANI, J. J.; HELBICH, M.; KAINZ, W.; BOLOORANI, A. D. Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [*s. l.*], v. 21, p. 265-275, 2013. DOI: 10.1016/j.jag.2011.12.014.

BAGHEL, S.; KOTHARI, M. K.; TRIPATHI, M. P.; SINGH, P. K.; BHAKAR, S. R.; DAVE, V.; JAIN, S. K. Spatiotemporal LULC change detection and future prediction for the Mand catchment using MOLUSCE tool. **Environmental Earth Sciences**, [*s. l.*], v. 83, n. 66, p. 01-15, 2024. DOI: 10.1007/s12665-023-11381-5.

ESA - European Space Agency. **Copernicus Global Digital Elevation Model**. Paris: OpenTopography, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.5069/G9028PQB. Acesso em: 30 mar. 2026.

FARIAS, V. E. M.; RODRIGUES, A. B.; MONTEIRO, P. B. C. L.; ARAUJO, D. C. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CABRAL, J. J. S. P. Perspectivas climáticas futuras com base nos modelos do CMIP6 para municípios da Região Metropolitana do Recife (PE), Brasil. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 25, n. 101, p. 58-79, 2024. DOI: 10.14393/RCG2510171642.

FERREIRA, C. S. S.; POTOCKI, K.; KAPOVIC-SOLOMUN, M.; KALANTARI, Z. Nature-Based Solutions for Flood Mitigation and Resilience in Urban Areas. *In*: FERREIRA, C. S. S. et al. (org.). **Nature-Based Solutions for Flood Mitigation:** Environmental and Socio-Economic Aspects**.** 107. ed. Springer, 2022. p. 59-78. DOI: 10.1007/698_2021_758.

FORTE – Fórum Popular do Rio Tejipió. **Histórico das atuações - FORTE**. Recife: 2025. Disponível em: https://new.express.adobe.com/webpage/bn3g5u6FEJWXz. Acesso em: 20 abr. 2026.

FREITAS FILHO, J. S.; CABRAL, J. J. S. P. Análise dos problemas do sistema de drenagem da bacia urbana do rio Tejipió. *In*: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 33., 2012, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: AIDIS, 2012.

GAO, C.; CHENG, D.; IQBAL, J.; YAO, S. Spatiotemporal Change Analysis and Prediction of the Great Yellow River Region (GYRR) Land Cover and the Relationship Analysis with Mountain Hazards. **Land**, [*s. l.*], v. 12, e340, 2023. DOI: 10.3390/land12020340.

GOMES, N. Segundo parque alagável no Barro, na Zona Oeste, é anunciado pela Prefeitura do Recife. **Diário de Pernambuco**, Recife, 12 jun. 2026. Disponível em: https://www.diariodepernambuco.com.br/vida-urbana/2026/04/11711888-segundo-parque-alagavel-no-barro-na-zona-oeste-e-anunciada-pela-prefeitura-do-recife.html. Acesso em: 20 abr. 2026.

HAILU, A; MAMMO, S.; KIDANE, M. Dynamics of land use, land cover change trend and its drivers in Jimma Geneti District, Western Ethiopia. **Land Use Policy**, [*s. l.*], v. 99, e105011, 2020. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.105011.

HANNA, E.; BRUNO, D.; COMÍN, F.A. The ecosystem services supplied by urban green infrastructure depend on their naturalness, functionality and imperviousness. **Urban Ecosystems**, [*s. l.*], v. 27, p. 187-202, 2024. DOI 10.1007/s11252-023-01442-9.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Base de Faces de Logradouros do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/28971-base-de-faces-de-logradouros-do-brasil.html. Acesso em: 30 mar. 2026.

KAMARAJ, M.; RANGARAJAN, S. Predicting the future land use and land cover changes for Bhavani basin, Tamil Nadu, India, using QGIS MOLUSCE plugin. **Environmental Science and Pollution Research**, [*s. l.*], v. 29, p. 86337-86348, 2022. DOI: 10.1007/s11356-021-17904-6.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F.; MONTEIRO, L. R. Integração das ciências e das tecnologias para redução de desastres naturais: socio-hidrologia e socio-tecnologia. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 7, p. 206-231, 2018. DOI: 10.19177/rgsa.v7e02018206-231.

MapBiomas. **Coleções MapBiomas**. São Paulo: MapBiomas, 2026. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/. Acesso em: 30 mar. 2026.

MUHAMMAD, R.; ZHANG, W.; ABBAS, Z.; GUO, F.; GWIAZDZINSKI, L. Spatiotemporal change analysis and prediction of future land use and land cover changes using QGIS MOLUSCE plugin and remote sensing big data: a case study of Linyi, China. **Land**, [*s. l.*], v. 11, n. 3, e419, 2022. DOI: 10.3390/land11030419.

MUÑOZ, S. M.; ELLIOTT, S.; SCHOELYNCK, J.; STAES, J. Urban Stormwater Management Using Nature-Based Solutions: A Review and Conceptual Model of Floodable Parks. **Land**, [*s. l.*], v. 13, n. 11, e1858, 2024. DOI: 10.3390/land13111858

PESSOA NETO, A. G.; SILVA, S. R.; BARBOSA, I. M. B. R. Mapeamento das áreas suscetíveis a inundações na bacia hidrográfica do rio Tejipió, em Pernambuco, Brasil. **Entorno Geográfico**, [*s. l.*], n. 26, e22413055, 2023. DOI: 10.25100/eg.v0i26.13055.

RODRIGUES, A. B.; ARAÚJO, D. C. S.; FARIAS, V. E. M.; CABRAL, J. J. S. P. Predictive modelling of land use land cover dynamics for a coastal urban city in Brazil. **Journal of Environmental Management**, [*s. l.*], v. 391, e126586, 2025. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.126586.

SANTOS, E. M.; RODRIGUES JUNIOR, J. C.; FERREIRA, L. T. L. M.; SILVA, S. S.; SANTOS, S. M.; OLIVEIRA, L. M. M.; PAIVA, A. L. R. Análise de tendências de variáveis ambientais na Região Metropolitana do Recife. *In*: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 17., 2024, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: ABRHidro, 2024.

SILVA, N. M. M.; MOURA, L. S.; PEREIRA, A. B. S.; PAZ, A. R.; CABRAL, J. J. S. P. Estimativa de áreas inundáveis no meio urbano a partir do descritor do terreno HAND: desafios e oportunidades. *In*: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 25., 2025, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: ABRHidro, 2025.

SILVA, P. O. **Modelagem hidrológica do rio Tejipió por ocasião de chuvas intensas levando em conta o efeito de marés**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SIVAPALAN, M.; SAVENIJE, H. H. G.; BLÖSCHL, G. Socio-hydrology: A new science of people and water. **Hydrological Processes**, [*s. l.*], v. 26, n. 8, p. 1270-1276, 2012. DOI: 10.1002/hyp.8426.

SOUZA JUNIOR, C. M. et al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, [*s. l.*], v. 12, n. 17, e2735, 2020. DOI: 10.3390/rs12172735.

VANELLI, F. M. **Contribuições da socio-hidrologia na redução de riscos e desastres associados a perigos naturais.** 2023. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

VIANA, J. F. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SRINIVASAN, R.; SANTOS, C. A. G.; MISHRA, M.; KALUMBA, A. M.; SILVA, R. M. Land Use and Land Cover Trends and Their Impact on Streamflow and Sediment Yield in a Humid Basin of Brazil's Atlantic Forest Biome. **Diversity**, [*s. l.*], v. 15, n. 12, e1220, 2023. DOI: 10.3390/d15121220.

ÍNDICE ESPECTRAL DE VEGETAÇÃO COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DE ARBORIZAÇÃO URBANA: O CASO DA CIDADE INTELIGENTE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS (SP)

1 Murilo Leite da Silva, 2 Claudia Vanessa dos Santos Corrêa
1 Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), e-mail: m169916@dac.unicamp.br; 2 Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), e-mail: clcorrea@unicamp.br

Palavras-chave: Planejamento Urbano; Áreas Verdes; Interior Paulista.

Resumo

Com benefícios que vão desde a melhora da qualidade de vida, a restauração e preservação da biodiversidade, até incentivos econômicos e novas formas de aproveitar o território ambientalmente protegido, a Arborização Urbana é essencial no planejamento urbano. O Índice Espectral NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é uma técnica rápida e de fácil aplicação, muito utilizada no Sensoriamento Remoto para auxiliar o monitoramento ambiental e o planejamento urbano. São José dos Campos é um município do interior paulista com mais de 700 mil habitantes e que está localizado junto a diversas Áreas de Proteção Ambiental. A aplicação do NDVI possibilita avaliar a preservação e subsidiar correlações com o Plano Municipal de Arborização Urbana (PMAU), que traz orientações na preservação da arborização já existente, noincremento da cobertura vegetal por meio de plantio e no estabelecimento der melhores diretrizes para a economia local, como o incentivo ao ecoturismo. As ações realizadas com as diretrizes do PMAU permitem que o município se destaque na área de planejamento urbano e gestão ambiental e se adeque com maior facilidade ao novo Plano Nacional de Arborização Urbana (PlaNAU).

Introdução

A arborização urbana é essencial para o planejamento de cidades mais sustentáveis e contribuem diretamente para a redução dos efeitos oriundos das mudanças climáticas, além de desempenhar um papel essencial na promoção da saúde pública (Amato-Lourenço *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2025). No contexto urbano, as árvores atuam na purificação do ar, absorvendo gases poluentes e outros compostos tóxicos, além de mitigar fenômenos urbanos (Santos *et al.*, 2013; Buckeridge, 2015; Melo *et al.*, 2019; De Vasconcelos, 2024). Não obstante, segundo Pivetta e Silva Filho (2002), "atualmente, a maioria da população humana vive no meio urbano, necessitando cada vez mais de condições que possam melhorar a convivência dentro de um ambiente muitas das vezes adverso'.

O conceito de arborização urbana compreende todas as árvores presentes na área urbana, abrangendo áreas verdes, como praças, parques, jardins privados e a arborização viária, presente nas ruas, avenidas, corredores verdes e outras. Também considera as Áreas de Preservação Permanente delimitadas por meio de preceitos legais e áreas de conservação e preservação em geral (Jardim; Umbelino, 2020).

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) "Cidades e comunidades sustentáveis" (número 11), que visa "tornar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis", proposto pela Organização das Nações Unidas (ONU), aponta em seu texto diversas áreas que devem ser tomadas como atenção, tais como o acesso inclusivo, a redução do impacto ambiental negativo, a redução da quantidade de pessoas afetadas pelos desastres naturais em especial os desastres causados pelas águas, o resguardo do patrimônio cultural e natural e o apoio de relações de impacto ambiental positivo nas cidades (ONU, 2025). Para além dessaespecifica, existem outras que dissertam sobre a preservação da biodiversidade, condições de vida dignas, saudáveis, acessíveis, justas, e principalmente sustentáveis. Sob estes aspectos, emerge o conceito de cidades sustentáveis, mais especificadamente as cidades inteligentes, que vão buscar, com base nas tecnologias atuais e novas, cumprir os objetivos da ODS (Tao et al., 2024).

As Cidades Inteligentes são as aquelas que buscam implementar tecnologias a fim de garantir um ambiente urbano que seja seguro, inclusivo e sustentável. As tecnologias aplicadas buscam proporcionar melhor eficiência, sustentabilidade e qualidade de vida. Para se alcançar as metas das cidades inteligentes, o planejamento urbano é fundamental (Nica et al., 2026).

Dentre as tecnologias comumente implementadas, capazes de oferecer um *feedback* da situação ambiental e auxiliar no planejamento urbano de uma cidade, estão as tecnologias associadas ao Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, em especial o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Dong et al., 2026). O NDVI é um índice espectral que baseia-se na razão entre a refletância das bandas de vermelho e infravermelho das imagens orbitais, considerado eficaz para quantificar a cobertura vegetal (Lee et al., 2023).

No Brasil, especificamente no Estado de São Paulo, a Secretaria de Desenvolvimento Econômico (2026), por meio do Decreto nº 69.332/2025 estabeleceu as diretrizes para que o estado ampliasse a quantidade de cidades inteligentes no país. Entretanto, São José dos Campos (SJC) já ostenta o título de Cidade inteligente, sustentável e resiliente desde 2022, sendo recertificada em 2023 e 2024 e alcançando a classificação platina (maior nível) em 2025 (São José Dos Campos, 2025a).

Considerando tal cenário, o objetivo principal deste trabalho é de apresentar as avaliações realizadas na atual situação do município de SJC em conjunto com suas políticas de arborização urbana, visando, especificamente, compreender como a arborização participa do contexto de uma cidade inteligente.

Material e Métodos

A área de estudo compreende o município de São José dos Campos (SJC), cuja delimitação do seu perímetro urbano foi adquirida por meio do Portal 'GeoSanja' (2025) (Figura 1).

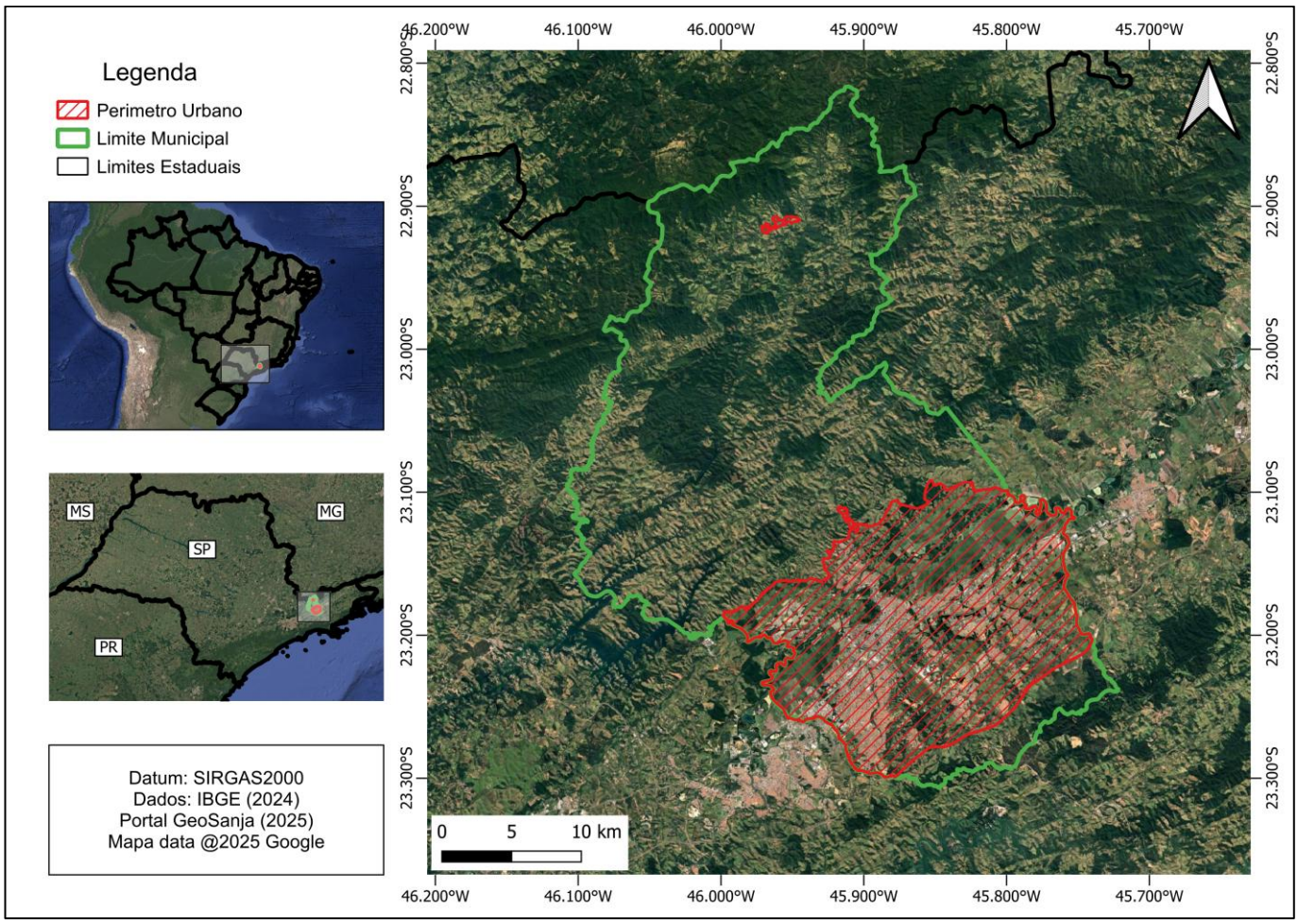


Figura 1 - Localização do perímetro urbano do município de São José dos Campos (SP). Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Quanto aos dados de Sensoriamento Remoto, foram selecionadas imagens orbitais do satélite Sentinel-2, especificamente as bandas B04 (vermelho) e B08 (infravermelho), ambas do dia 17 de outubro de 2025. Ambas possuem resolução espacial de 10 metros e possuem porcentagem de cobertura de nuvens inferior a 10%.

Posteriormente, em ambiente SIG (*QuantumGIS Desktop* 3.40.10), utilizando técnicas de Geoprocessamento de junção (*Merge*) e recorte espacial (*Extraction)*, foram extraídas das imagens adquiridas apenas a área alvo de análise. Em seguida, o cálculo do Índice Espectral de Vegetação NDVI foi realizado com o emprego do algoritmo "*Raster Calculator*" (Equação 1)

$$NDVI = \frac{(NIR(B08) - RED(B04))}{(NIR(B08) + RED(B04))} \quad (1)$$

Onde NIR (*Near Infrared Spectroscopy*) e RED correspondem respectivamente às bandas 08 e 04 do instrumento *MSI* (Sentinel-2).

Ademais, foi necessário reclassificar os resultados do *raster* NDVI obtido para 3 classes por meio da ferramenta *GRASS r.recode,* baseando-se nos preceitos do *Earth Observing System* – EOS (2024). Para se obter dados numéricos da relação entre cobertura vegetal e a extensão da área de estudo, foi utilizado o índice UGSI (*Urban Green Space Index*), apresentado no estudo de Cardoso (2025) (Equação 2):

$$UGSI = \frac{V}{A} \quad (2)$$

Onde V é toda a área vegetada (vegetação densa + vegetação esparsa) (km²) e A é a área total em análise (km²).

Resultados e Discussão

A aplicação do Índice Espectral NDVI apresentou a presença e ausência de vegetação na área de estudo. Para uma melhor análise e visualização, foram separadosos perímetros urbanos do Distrito de São Francisco Xavier (Distrito SFX), e da cidade de São José dos Campos (Figura 2).

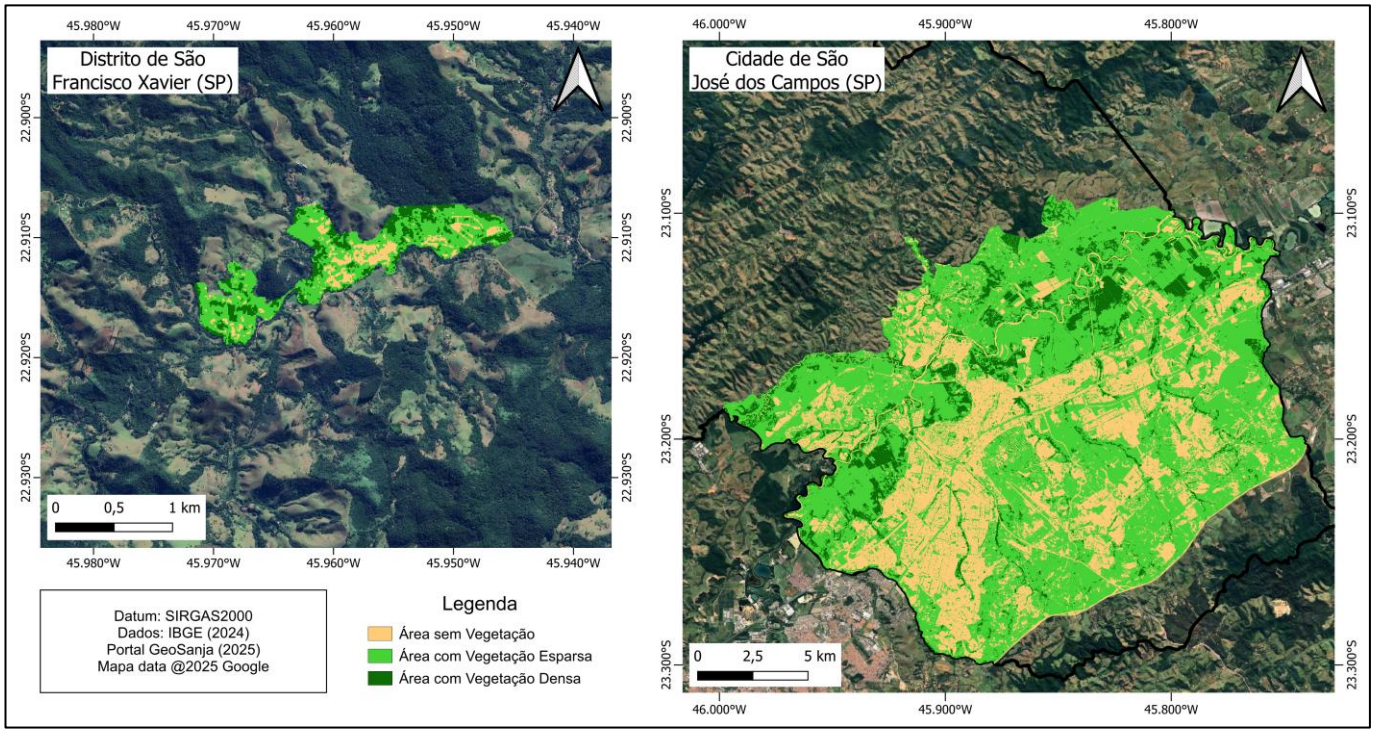


Figura 2 - Presença e ausência de vegetação na área de estudo. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os valores quantitativos obtidos pelo cálculo do NDVI e pelo índice UGSI são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Total de área sem vegetação, com vegetação esparsa, com vegetação densa, total (km²) e porcentagem de cobertura vegetal por área de estudo (%).

Local	Distrito de São Francisco Xavier (SP)	Cidade de São José dos Campos (SP)
Area sem vegetação (km²)	0,1648	111,2373
Area com vegetação esparsa (km²)	0,6883	210,4980
Area com vegetação Densa (km²)	0,2694	32,8921
Area territorial (km²)	1,1226	354,6274
UGSI (*Urban Green Space Index*) (%)	85,32	68,63

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os valores de cobertura vegetal de SJC são elevados, e na cidade mais de 68% da sua área urbana possui cobertura vegetal, ao passo que no distrito de SFX mais de 85% do perímetro urbano é arborizado.

São José dos Campos possui uma estrutura de preservação e interesse ambiental complexa, com diversas Áreas de Proteção Ambiental (APA) considerando limites e extralimites do seu perímetro urbano, além de parques naturais e urbanos bem distribuídos (Figura 3).

As Áreas de Proteção Ambiental (APA) são Unidade de Conservação que estão inseridas no Grupo das Unidades de Uso Sustentável da Lei Federal nº 9.985/2000, que regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal. Não obstante, UCs são definidas como um "Espaço territorial e seus recursos ambientais, incluindo as águas jurisdicionais, com características naturais relevantes, legalmente instituído pelo Poder Público, com objetivos de conservação e limites definidos, sob regime especial de administração, ao qual se aplicam garantias adequadas de proteção" (Brasil, 2000).

Especificamente, APA é definida pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) como áreas que visam proteger a diversidade biológica e regular a ocupação para que se garantir o uso sustentável dos recursos naturais (Brasil, 2024). Podem ser de propriedades públicas ou privadas, e SJC possui APAs nas três esferas administrativas, com algumas sobreposições (Figura 3).

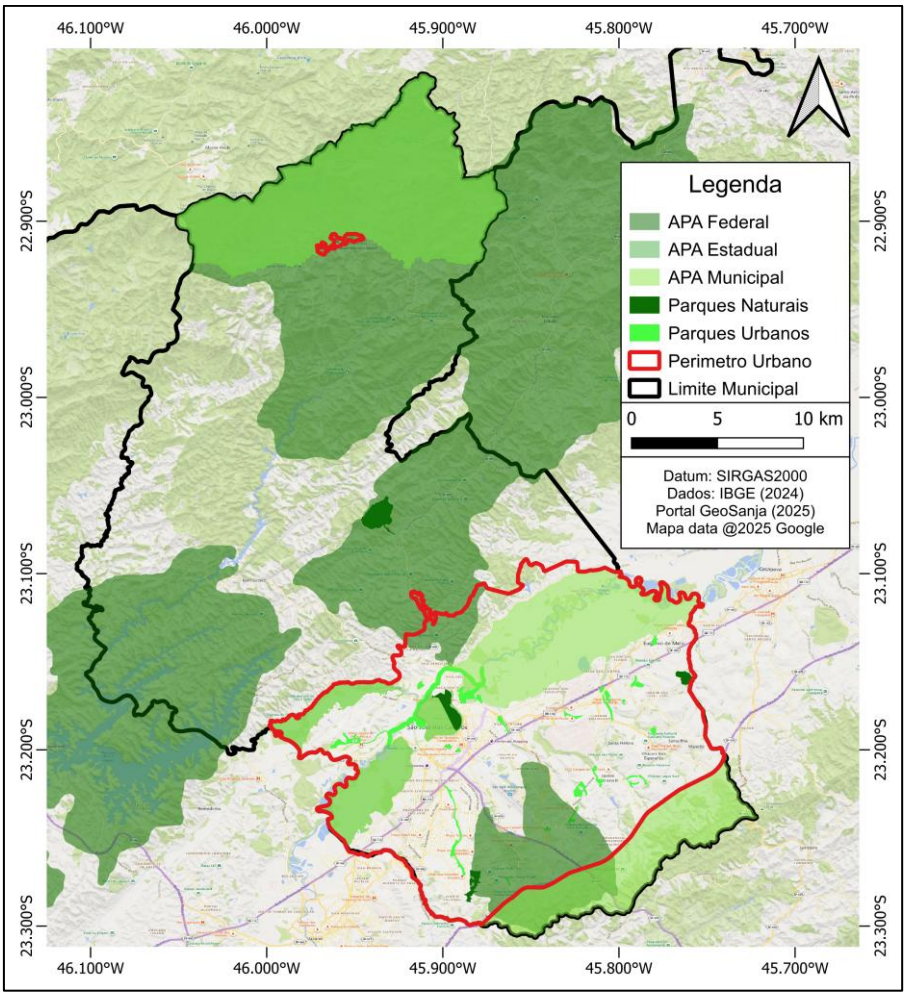


Figura 3 - Áreas de interesse ambiental em São José dos Campos (SP). Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

A APA Federal da Bacia do Rio Paraíba do Sul foi instituída por meio do Decreto Federal nº 87561/82, que dispõe sobre as medidas de recuperação e proteção ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Ela abrange parcialmente as Microbacias do Rio do Peixe em São Francisco Xavier, da Represa do Rio Jaguari, do Rio Buquira, do Córrego do Vidoca e do Ribeirão dos Putins, compreendendo áreas urbanas e rurais (São José dos Campos, 2024a). O perímetro urbano do Distrito de São Francisco Xavier está localizado no interior da APA da Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe, e somente a Represa do Jaguari não possui extensão em área no perímetro urbano municipal. A principal função dessa APA é garantir a qualidade hídrica de interesse regional (Brasil, 1982).

Na esfera estadual compreende a duas APAs em SJC: a APA Estadual de São Francisco Xavier e a APA do Banhado, ambas instituídas pela Lei Estadual nº11262/02. O Plano de Manejo da APA de São Francisco Xavier foi instituído pela Resolução SMA n. 64 de 2008. AAPA do Banhado, entretanto,ainda não possui regulamentação até o momento, porém a legislação apresenta restrições como o parcelamento de solos para fins urbanos, instalação ou ampliação de indústrias ou áreas industriais, manejo de solo, assoreamento dos cursos de água, remoção da cobertura vegetal existente e outras normativas (ALESP, 2002; SEMIL, 2008)

No âmbito municipal, o Plano Diretorvigente manteve 4 APAs, criadas a partir da Lei Complementar n. 121/95: APA I (Mantiqueira), APA II (Rio do Peixe e Jaguari), APA III (Serra do Jambeiro), APA IV (Várzeas do Paraíba e Jaguari) (São José dos Campos, 2018). A APA I da Serra da Mantiqueira corresponde ao mesmo território que a APA Estadual de São Francisco Xavier, inserida na APA Federal da Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe, e aAPA Estadual do Banhado abrange parte dos terrenos classificados como APA IV Municipal.

Ademais, SJC também conta com unidades de Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN), sendo RPPN O Primata, RPPN Alto do Deco, RPPN Reserva dos Muriquis e RPPN Fazenda San Michele, totalizando juntas uma área de 502.25 hectares.

A presença de APAs em diversas áreas do território municipal exige que em alguns terrenos as análises ambientais sejam mais rigorosas do que em outras. A cidade de SJC, entretanto, busca se adequar a esta realidade legal e territorial através de "Áreas de Desenvolvimento Estratégico - ADE", conceito empregado pelo Plano Diretor vigente (São José dos Campos, 2018).

São Francisco Xavier possui diretrizes claras para seu desenvolvimento econômico, como a atração de turismo de baixo impacto, o desenvolvimento da agricultura familiar, melhoraria da mobilidade local, aperfeiçoamento dos mecanismos de controle da ocupação do solo, oferecimento de alternativas sustentáveis para o uso das propriedades localizadas no distrito,

promoção do desenvolvimento social e ampliação de programas de remuneração com base na prestação de serviços ambientais (São José dos Campos, 2018).

O distrito , obviamente, emprega as diretrizes do Plano Diretor de SJC e se apresenta como um destino de turismo relaxante em meio à natureza, fortalecendo o ecoturismo da região, com atrações como montanhismo, trilhas, cachoeiras, cultura e comida local, alimentos orgânicos e outros (Mazzola, 2024).

Os resultados dessarelação com as diretrizes administrativas e com o fortalecimento do contato urbano natural,pôde ser observado com a aplicação do índice espectral NDVI do distrito, com uma cobertura vegetal que preenche mais de 80% do seu perímetro urbano.

Quando se avalia a cidade de SJC, as áreas verdes e sua cobertura vegetal é bastante presente nas APAs, e apesar destas ocuparem 150km² do perímetro urbano, resultando em 42% do território urbano municipal, a sugestão do Plano Municipal de Arborização Urbana (PMAU) foi de explorar o potencial dessas áreas para potencializar a função das áreas verdes no município, através de sua integração com a arborização das vias, praças e parques urbanos (São José dos Campos, 2016).

No PMAU de SJC foi priorizado o uso de espécies com copas maiores, para que gerasse maior área de sombra, e contraindicados a utilização de arbustos e árvores de pequeno porte para a arborização das ruas. O plano considerou o formato das ruas e calçadas de cada bairro e o tempo para plantio estabelecido foi de 12 anos, pois em 24 anos todas as árvores já terão se estabelecido na fase adulta. Ao todo, é esperado que ocorram 56.565 plantios em calçadas, priorizando primeiro os bairros menos arborizados e buscando realizar o plantio de forma equilibrada, para que toda a população seja beneficiada aos poucos até se atingir a meta final (São José dos Campos, 2016).

Ainda, adequar a arborização em uma cidade requer um planejamento e adaptações dos locais já existentes, e em SJC isto é previsto no respectivo plano no item de plantios no leito carroçável, que estabelece o plantio em vagas de estacionamentos, para ruas que possuem calçadas estreitas, e o plantio em canteiros divisores de pistas e ilhas de canalização (Figura 4). Também são deliberadas a adequação dos canteiros que já existem, mas que atualmente estão inadequados (São José dos Campos, 2016).

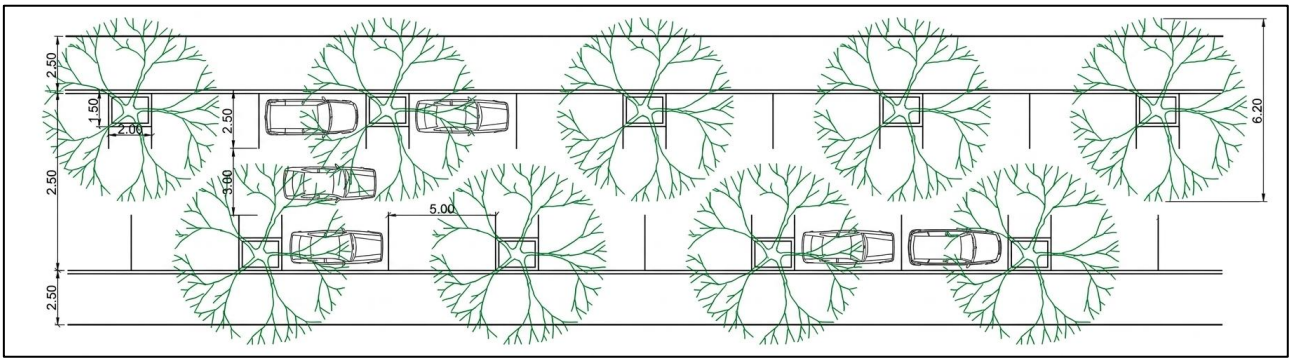


Figura 4 - Plantios no leito carroçável em São José dos Campos. Fonte: Adaptado do PMAU (2016).

Ao analisar um plano de arborização que já atingiu 40% do tempo proposto em suas metas, se torna inevitável o questionamento da eficiência de tal plano. Assim,é possível avaliar parte dos resultados quando no Censo 2022 foi apontado que o município possui 85% das vias arborizadas (IBGE, 2025). O índice UGSI obtido resultou na quantificação de 68% do território urbano coberto por vegetação.

Para além do plano de plantio de árvores em vias urbanas, o município ainda possui programas de adoção de praças e áreas verdes e apoio para o manejo e cuidado com a arborização urbana, assumindo para si, mas compartilhando com todos que as responsabilidades com o meio ambiente natural urbanizado. Outra tecnologia adotada é a catalogação das espécies arbóreas do município, o Portal Árvores disponibiliza todas a informações que podem ser acessadas via sítio eletrônico ou QRcode presente nas espécies (São José dos Campos, 2024b). Outra ação prevista no Plano Diretor do município (São José dos Campos, 2018) é o fortalecimento da educação ambiental, instituído pela Lei Municipal n. 7112/06.

Em março de 2026, o Ministério do Meio Ambiente, por meio da Portaria GM/MMA nº 1.639/2026, estabeleceu o Plano Nacional de Arborização Urbana (PlaNAU).

O PlaNAU possui 20 diretrizes nacionais no âmbito da presença de áreas verdes em centros urbanos, dentre elas a valorização de espécies nativas,promoção da diversidade, valorização cultural e fortalecimento da identidade local, planejamento baseado em potencial de plantio, princípio da não-regressividade, geração de serviços ecossistêmicos, todos e outros em consonância com as diretrizes dos PMAU (2016) e o Plano Diretor (2018) de SJC.

O Plano Nacional ainda prevê um período de 20 anos até 2045 para a implementação de suas ações estratégicas, o que coloca São José dos Campos em vantagem, já que o Plano Municipal tem previsão de conclusão do plantio em 2029, com possibilidade de observação dos resultados em 2042. Assim, restam 3 anos para que o município adeque pequenos contratempos, casonecessário. Entretanto, cabe ao município rever seu Plano de Arborização, e se for preciso expandir suas ações considerando estratégias definidas pelo PlaNAU.

Somando-se os diversos fatores que irão garantir o sucesso do município em suas metas, cabe acrescentar que SJC finalizou o ano de 2025 com boas perspectivas ambientais, entre elas a 6ª certificação consecutiva do selo internacional *Tree Cities of the World* (São José dos Campos, 2025b).

Considerações Finais

O município de São José dos Campos (SP) possui resultados satisfatórios quanto à presença de cobertura vegetal considerando a aplicação do índice espectral NDVI, principalmente quando analisados complementarmente pelo índice UGSI. Analisar a fonte desses resultados apresenta uma rede complexa de fatores, como a existência de Áreas de Proteção Ambiental de níveis federais, estaduais e municipais, que torna as prescrições legais mais definidas e em alguns casos rígidos para a expansão territorial, embora enquadradas como Unidades de Conservação de Uso Sustentável. Assim, torna-se necessário a implementação de soluções sustentáveis para a utilização da área municipal, como o incentivo ao ecoturismo, valorização dos serviços ambientais e dentre outras possibilidades.

Um plano de arborização urbana municipal bem elaborado, com soluções pensadas para as diversas realidades do município torna possível o alcance dasmetas estabelecidas. Nesse cenário, conforme evidenciado, o município ao longo dos anos conseguiu utilizar seus progressos em busca de reconhecimentos nacionais e internacionais por meio de eventos e certificações.

Por fim,elucida-se que a adoção de um plano de arborização municipal anterior permite uma maior facilidade na adequação com o plano de arborização nacional, já que suas ações possuem grande consonância, majoritariamente.

Agradecimentos

O Autor gostaria de agradecer à Prof.ª Dr.ª Claudia Vanessa dos Santos Corrêa pela paciência e empatia ao me orientar, a Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas (FT-UNICAMP) e ao Programa de Bolsas de Iniciação científica (PIBIC) pelo apoio financeiro recebido.

Referências Bibliográficas

AMATO-LOURENÇO, L. F. et al. Metrópoles, cobertura vegetal, áreas verdes e saúde. **Estudos Avançados**, v. 30, n. 86, p. 113–130, 2016.

BRASIL. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **APA - Área de Proteção Ambiental**. Brasília,: ICMBio, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/unidades-de-conservacao/apa. Acesso em: 23 mar. 2026.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. **Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências**. Brasília,, 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm. Acesso em 27 mar. 2026.

BRASIL. Decreto nº 87.561, de 13 de setembro de 1982. **Dispõe sobre as medidas de recuperação e proteção ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e dá outras providências**. Brasília, 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/atos/decretos/1982/d87561.html. Acesso em 27 de mar. 2026.

BUCKERIDGE, M. Árvores urbanas em São Paulo: planejamento, economia e água. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 85-101, 2015.

CARDOSO, A. P. F. Mapeamento de Cobertura Vegetal Urbana Utilizando NDVI no Município de Duque de Caxias-RJ. **História, Natureza e Espaço**, v. 14, n. 2, p. 1–25, 2025.

DE VASCONCELOS, B. N. Arborização urbana: essencial para a qualidade de vida da população. **Pensando Sustentável: reflexões interdisciplinares para um futuro resiliente**, cap. 2, p. 33-43, 2024.

DONG, G. et al. Urban Spatial Expansion and Coordinated Development of Ecological Environment: Coupling Mechanism and Optimization Pathways. **International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems (IJAEIS)**, v. 17, n. 1, p. 1-16, 2026.

EOS – Earth Observing System. **NDVI FAQ**: all you need to know about NDVI. EUA: EOS, 2024. Disponível em: https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/. Acesso em: 06 fev. 2026.

ESTADO DE SÃO PAULO. Lei nº 11.262, de 08 de novembro de 2002. **Declara Áreas de Proteção Ambiental o trecho da Serra da Mantiqueira e as áreas urbanas no Município de São José dos Campos**. São Paulo:Alesp, 2002. Disponível em: https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2002/lei-11262-08.11.2002.html. Acesso em 27 mar. 2026.

ESTADO DE SÃO PAULO. Resolução SMA N 064 de 11 de setembro de 2008. **Institui Plano de Manejo da Área de Proteção Ambiental - APA São Francisco Xavier**. São Paulo, Semil, 2008. Disponível em: https://smastr16.blob.core.windows.net/legislacao/sites/262/2022/07/2008resolucao_sma_064_2008-1.pdf. Acesso em 20 mar. 2026.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO E GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022**: características urbanísticas do entorno dos domicílios. IBGE: Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv102168.pdf. Acesso em: 25 abr. 2025

JARDIM, P.; UMBELINO, G. Mapeamento de áreas verdes e da arborização urbana: estudo de caso de Diamantina, Minas Gerais. **Revista Espinhaço**,v. 9, n. 1, 2020.

LEE, G. et al. Vegetation Classification in Urban Areas by Combining UAV-Based NDVI and Thermal Infrared Image. **Applied Sciences**, v. 13, n. 515, 2023.

MAZZOLA, M. **São Francisco Xavier**: hospedagens, passeios e roteiros. São Paulo: Viagem e Turismo, 2024. Disponível em: https://viagemeturismo.abril.com.br/cidades/sao-francisco-xavier/. Acesso em: 23 mar. 2026.

MELO, R. R.; LIRA FILHO, J. A.; RODOLFO JÚNIOR, F. Diagnóstico qualitativo e quantitativo da arborização urbana no bairro Bivar Olinto, Patos, Paraíba. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 2, n. 1, p. 64-80, 2019

NICA, I.; DELCEA, C.; IONESCU, Ș. Urban accessibility and digital transformation: A bibliometric study of the 15-Minute City and smart city technologies. **Cities**, v. 171, p. 106797, 2026.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável:** As Nações Unidas no Brasil. 2025. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 7 abr. 2025

PIVETTA, K. F. L.; SILVA FILHO, D. F. **Arborização urbana.** Boletim Acadêmico, Série Arborização Urbana. Jaboticabal: Unesp, 2002. Disponível em: https://sites.usp.br/podalab/wp-content/uploads/sites/1036/2022/01/000-USP-ESALQ-arborizacao_urbana-Khatia.pdf. Acesso em: 25 abr. 2025.

SANTOS, G. P. dos et al. A importância da arborização urbana e seus desafios para a implantação de qualidade. **Brazilian Journal of Development**, v. 11, n. 2, e77859, 2025

SANTOS, Taciana O. dos et al. Influence of urbanization on land surface temperature in Recife city. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 6, p. 1234-1244, 2013.

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS (SP). Prefeitura Municipal. **São José dos Campos**: 1ª cidade do mundo certificada pela ISO 37125. São José dos Campos, 2025a. Disponível em: https://www.sjc.sp.gov.br/noticias/2025/novembro/10/s%C3%A3o-jos%C3%A9-dos-campos-1%C2%AA-cidade-do-mundo-certificada-pela-iso-37125/. Acesso em: 27 fev. 2026.

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. Prefeitura Municipal. **Retrospectiva 2025**: São José cresce com sustentabilidade. São José dos Campos: Secretaria de Inovação e Desenvolvimento Econômico, 2025b. Disponível em: https://www.sjc.sp.gov.br/noticias/2025/dezembro/26/retrospectiva-2025-sao-jose-cresce-com-sustentabilidade/. Acesso em: 23 mar. 2026.

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. Prefeitura Municipal. **Sobre as UCs**: Unidades de Conservação. São José dos Campos: Secretaria de Urbanismo e Sustentabilidade, 2024a. Disponível em: https://www.sjc.sp.gov.br/servicos/urbanismo-e-sustentabilidade/unidades-de-conservacao/sobre-as-ucs/. Acesso em: 23 mar. 2026.

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS (SP). Prefeitura Municipal. **Arborização Urbana**: Sistema de Gestão de Árvores. São José dos Campos: Secretaria de Urbanismo e Sustentabilidade, 2024b. Disponível em: https://arvores.sjc.sp.gov.br. Acesso em: 11 abr. 2026.

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS (SP). **Lei Complementar nº 612, de 30 de novembro de 2018**. Dispõe sobre o Zoneamento, o Uso e a Ocupação do Solo do Município de São José dos Campos e dá outras providências. São José dos Campos: Câmara Municipal, 2018. Disponível em: https://camarasempapel.camarasjc.sp.gov.br/Arquivo/Documents/legislacao/html_impressao/C6122018.HTML. Acesso em: 23 mar. 2026.

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS (SP). Prefeitura Municipal. **Plano Municipal de Arborização Urbana**: sistematização de informações sobre arborização urbana. Elaboração: IPPLAN; Secretaria de Meio Ambiente. São José dos Campos: PMSJC, 2016. Disponível em: https://www.sjc.sp.gov.br/servicos/urbanismo-e-sustentabilidade/arvores/plano-municipal-de-arborizacao-urbana/. Acesso em: 23 mar. 2026.

SECRETARIA ESTADUAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE SÃO PAULO. **Programa CIDADES INTELIGENTES**. São Paulo, s.d. Disponível em: https://cidadesinteligentes.sp.gov.br. Acesso em: 27 fev. 2026.

TAO, F. et al. makeTwin: A reference architecture for digital twin software platform. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 37, n. 1, p. 1–18, 2024.

FRAGMENTAÇÃO FLORESTAL E ASSIMILAÇÃO DO CARBONO EM UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DO SUL DA BAHIA

1 Micléia Nascimento Vieira, 2 Gabriela Luchetti dos Santos Vieira, 3 Julia De Carvalho Brito, 4 Elfany Reis do Nascimento Lopes, 5 Roberto Wagner Lourenço

1 Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de Sorocaba, e-mail: micleia.vieira@unesp.br; 2 Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de Sorocaba, e-mail: gabriela.luchetti@unesp.br; 3 Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de Sorocaba, e-mail: julia.c.brito@unesp.br; 4 Universidade Federal do Sul da Bahia, Câmpus Sosígenes Costa, e-mail: elfany@csc.ufsb.edu.br; 5 Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de Sorocaba, e-mail: roberto.lourenco@unesp.br

Palavras-chave: Florestas; Áreas Protegidas; Aprendizado de Máquina

Resumo

Os resultados apresentados neste trabalho, são decorrentes da pesquisa realizada em áreas florestadas das Unidades de Conservação (UCs) de Proteção Integral (PI) e Uso Sustentável (US) no sul da Bahia, Brasil. O estudo teve como objetivo avaliar a fragmentação florestal e sua influência sobre o potencial de assimilação de carbono em Unidades de Conservação do sul da Bahia, por meio da integração de métricas da paisagem e modelagem baseada em aprendizado de máquina. Foi construído um banco de dados adquirido através da plataforma do Cadastro Nacional das Unidades de Conservação (CNUC) referente as UCs, e um banco de dados referente ao uso da terra, obtido junto a plataforma do MapBiomas, considerando o ano de 2024. Foram calculadas as métricas da paisagem referentes ao perímetro, relação perímetro/área, dimensão fractal e índice de forma, por meio do software Fragstats versão 4.2. Os fragmentos florestais foram organizados para análise e sistematização, segundo o tamanho, em: Muito pequeno (<5 ha), Pequeno (5–10 ha), Médio (10–100 ha) e Grande (>100ha). Posteriormente, foi analisada a relação entre as variáveis, modeladas no software R por meio do algoritmo *Random Forest*. As UCs do sul da Bahia para o ano de 2024 apresentaram 20 classes de uso da terra, totalizando 788.047,06 ha nas UCs de US e 150.944,96 ha nas UCs de PI. Em ambas as categorias se observa predominância da classe formação florestal, 55,38% para a primeira, e 79,32% para a segunda. A paisagem encontra-se fragmentada, uma vez que foram identificados mais de 1.200 fragmentos nas UCs de PI e mais de 11.000 nas UCs de US, com predominância de fragmentos muito pequenos (<5 ha) em ambas as categorias de manejo, representando mais de 89% do total. As métricas revelaram elevada variabilidade no tamanho dos fragmentos, com altos desvios padrão e distribuição heterogênea da cobertura florestal. A relação perímetro/área mostrou predominância de efeitos de borda, enquanto os baixos valores de dimensão fractal e índice de forma indicam formas simples, associadas à conversão da paisagem por atividades humanas. A paisagem das UCs do sul da Bahia é estruturalmente fragmentada e heterogênea, com dependência de poucos grandes remanescentes e predominância de pequenos fragmentos isolados. Quanto ao fluxo de carbono, embora se verifique uma tendência de aumento com o incremento da área dos fragmentos, essa variação é pouco representativa, indicando que o tamanho do fragmento e o tipo de categoria de UC, isoladamente, apresentam baixa capacidade explicativa sobre o potencial de assimilação de carbono nessas paisagens.

Introdução

A destruição e degradação de ecossistemas naturais induzidas por atividades humanas como desmatamento, urbanização, agricultura e mineração, são as causas primárias do declínio da biodiversidade global (Vancine *et al*., 2024). A perda de área e o consequente aumento da fragmentação alteram a estrutura e a função dos habitats remanescentes, resultando em reduções da diversidade biológica (Gonçalves-Souza *et al*., 2025; Yuan; Zhang; Zhang, 2024). Nos biomas brasileiros, esses impactos são evidentes. O Cerrado e a Caatinga sofrem com a expansão agrícola e queimadas, a Amazônia enfrenta desmatamento acelerado e mineração ilegal, e o Pantanal é afetado por drenagens e incêndios frequentes (Arruda *et al*., 2024; Colman *et al*., 2024; Justino *et al*., 2024; Siqueira-Gay; Sánchez, 2021). Entre todos, a Mata Atlântica se destaca pela intensa fragmentação, com mais de 97% de seus remanescentes representados por fragmentos pequenos e isolados, além da perda da cobertura contínua original e da predominância de bordas nas áreas remanescentes (Vancine *et al*., 2024).

As Áreas Protegidas (APs) são definidas como espaços geográficos delimitados e reconhecidos, geridos por instrumentos legais ou outros mecanismos eficazes, com o objetivo de assegurar a conservação da natureza, bem como dos serviços ecossistêmicos e dos valores culturais associados. Nesse contexto, desempenham papel fundamental na manutenção da integridade e na conectividade de fragmentos florestais, favorecendo o fluxo de espécies e a continuidade de processos ecológicos que tendem a ser comprometidos em paisagens antropizadas (Linero-Triana; Correa-Ayram; Velásquez-Tibatá, 2023; IUCN, 2026). No Brasil, essas áreas são representadas principalmente pelas Unidades de Conservação (UCs), instituídas pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), que as organiza em dois grandes grupos: Proteção Integral (PI), voltadas prioritariamente à preservação da natureza e ao uso indireto dos recursos naturais; e Uso Sustentável (US), que permitem a utilização dos recursos naturais de forma compatível com sua conservação (Brasil, 2000). Entretanto, a efetividade dessas áreas pode ser reduzida quando submetidas a pressões antrópicas intensas, considerando que estas podem comprometer a capacidade

de conservação e manutenção de processos ecológicos dessas áreas.

O sul da Bahia, inserido na Mesorregião Sul Baiano, abriga um dos mais relevantes conjuntos de Unidades de Conservação da Mata Atlântica. Apesar disso, a ocupação humana histórica, associada à expansão de atividades econômicas, promoveu intensas transformações na paisagem regional (Ramos; Nuvoloni; Lopes, 2022). De acordo com os mesmos autores, entre 1985 e 2019, a região perdeu aproximadamente 328 mil hectares de cobertura florestal, sendo que cerca de 99% dessa área foi convertida principalmente em pastagens e plantações de silvicultura. Essa redução florestal está diretamente relacionada ao processo de fragmentação da paisagem, no qual os remanescentes de vegetação nativa passam a ocorrer de forma isolada, imersos em uma matriz antrópica dominada por pastagens e monoculturas, resultando na diminuição do tamanho dos fragmentos, no aumento do isolamento entre eles e na intensificação dos efeitos de borda (Ma *et al*., 2023; Haddad *et al*., 2015). Tais alterações podem comprometer a dinâmica ecológica, manutenção da biodiversidade e provisão de serviços ecossistêmicos (Liu *et al*., 2026; Gonçalves-Souza *et al*., 2025). Além das alterações na estrutura da paisagem, a fragmentação pode afetar processos ecológicos fundamentais, como a assimilação de carbono, ao alterar a produtividade da vegetação, a biomassa e o funcionamento dos ecossistemas (Haddad *et al*., 2015).

Nesse cenário de intensa perda florestal e fragmentação, torna-se fundamental analisar a estrutura da paisagem para compreender os efeitos desses processos sobre os ecossistemas. As métricas da paisagem permitem descrever e quantificar padrões espaciais de fragmentos florestais, incluindo aspectos como tamanho, forma, grau de isolamento e conectividade entre manchas de vegetação nativa, sendo utilizadas na ecologia da paisagem para subsidiar estratégias de conservação e orientar o planejamento ambiental, especialmente em regiões altamente fragmentadas, como a Mata Atlântica (Pinheiro; Pinheiro, 2024; Vancine *et al*., 2024). Por outro lado, índices derivados de sensoriamento remoto, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o *Photochemical Reflectance Index* (PRI), bem como estimativas de fluxos de carbono, permitem caracterizar a condição e o funcionamento da vegetação, fornecendo informações sobre a dinâmica do carbono em escala da paisagem. Esses indicadores têm sido utilizados para inferir padrões de produtividade, eficiência de uso da luz e trocas de carbono entre a vegetação e a atmosfera, contribuindo para a compreensão dos processos ecossistêmicos em diferentes escalas espaciais (Xiao *et al*., 2019; Garbulsky *et al*., 2011). Nesse contexto, o uso de aprendizado de máquina contribui para integrar diferentes fontes de dados e identificar relações complexas entre a estrutura da paisagem, a condição da vegetação e a dinâmica do carbono. Entre essas abordagens, o algoritmo *Random Forest* destaca-se por sua robustez e pela capacidade de lidar com conjuntos de dados multivariados, além de permitir a avaliação da importância relativa das variáveis explicativas (Reyes-Muñoz *et al*., 2024; Van Jaarsveld; Hauswirth; Wanders, 2024).

O presente estudo teve como objetivo avaliar a fragmentação florestal e sua influência sobre o potencial de assimilação de carbono em Unidades de Conservação do sul da Bahia, por meio da integração de métricas da paisagem e modelagem baseada em aprendizado de máquina.

Material e Métodos

Área de estudo

As áreas protegidas do sul da Bahia (Figura 1) somam 13 UCs de Proteção Integral (PI) e 133 de Uso Sustentável (US), distribuídas em quatro territórios de identidade, Extremo Sul, Costa do Descobrimento, Litoral Sul e Baixo Sul, compreendendo 70 municípios (SEI-BA, 2023). Os territórios são uma forma de regionalização do estado, no qual agrupa-se municípios com características culturais, geoambientais e socioeconômicas semelhantes com o intuito de planejar o desenvolvimento local.

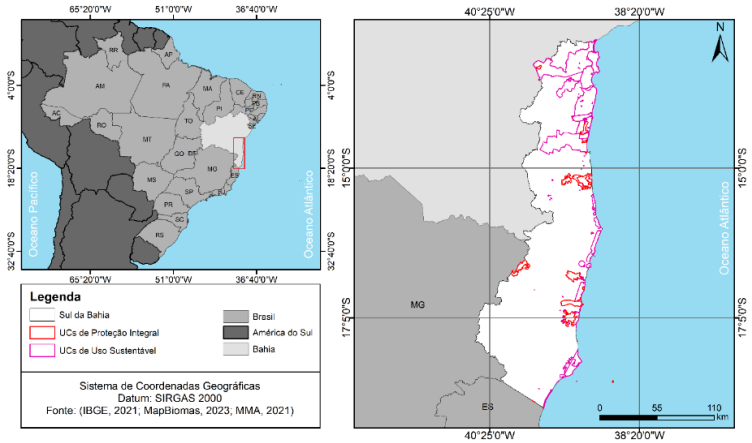


Figura 01: Localização das Unidades de Conservação de Proteção Integral e Uso Sustentável do sul da Bahia. Fonte: Autoria Própria (2026)

A região no qual as UCs estão inseridas (sul da Bahia) possui histórico de modificações e mudanças graduais influenciados pelas atividades humanas, com redução de 14% de suas áreas florestais (Ramos; Nuvoloni; Lopes, 2022). Essas perdas ocorreram em fragmentos florestais inseridos em terras privadas, mas também em UCs em função da mudança no uso da

terra, trazendo como consequência a extinção de espécies e perdas de serviços ecossistêmicos (Walder *et al*., 2024; Mota *et al*., 2022; Ramos; Nuvoloni; Lopes, 2022; Vieira; Ornellas; Lopes, 2022).

Coleta e Análise de dados

Foi construído um banco de dados com as UCs do sul da Bahia, adquirido através da plataforma do Cadastro Nacional das Unidades de Conservação (CNUC). Para padronização da base espacial, os limites da UCs foram processados no *software* QGIS 3.38, com base no grupo de manejo das UCs, permitindo a agregação das áreas e a geração de duas camadas espaciais: uma representando as UCs de Uso Sustentável e outra as de Proteção Integral.

O uso da terra foi extraído do Projeto de Mapeamento Anual de Cobertura e Uso do Solo no Brasil na plataforma denominada MapBiomas (Matos *et al*., 2025), para o ano de 2024. Atualmente estão disponíveis uma série de 39 anos cobrindo toda a extensão do Brasil baseados na série Landsat com resolução de 30 m e precisão média de 89% para os Biomas, entre eles a Mata Atlântica (Ribeiro *et al*., 2024; Souza Júnior *et al*., 2020). As camadas foram reprojetadas para o sistema de referência espacial UTM e Datum horizontal SIRGAS 2000, zona 24S.

Para caracterização da estrutura espacial da classe formação florestal, foram selecionadas métricas da paisagem relacionados ao tamanho, forma e complexidade geométrica. Foram utilizadas as métricas áreas, perímetro, relação perímetro/área, dimensão fractal e índice de forma, por permitirem avaliar a configuração espacial dos remanescentes florestais e o grau de fragmentação da paisagem. Os cálculos foram realizados por meio do software Fragstats versão 4.2. Posteriormente, os resultados foram organizados e tratados no *software* Microsoft Excel para análise e sistematização dos dados. Além disso, os fragmentos pertencentes à classe formação florestal foram classificados de acordo com classes de tamanho propostas por Santos *et al*. (2018): Muito pequeno (<5 ha), Pequeno (5–10 ha), Médio (10–100 ha) e Grande (>100ha). Essa classificação foi aplicada exclusivamente à formação florestal por se tratar da classe de maior interesse ecológico no estudo, permitindo avaliar com maior detalhe o grau de fragmentação, a distribuição dos remanescentes e sua relevância para a manutenção da conectividade e da biodiversidade na paisagem.

Posteriormente, foi obtido o fluxo de carbono (CO_2flux), indicador da eficiência da produtividade líquida da vegetação (Yang *et al*., 2016), estimado a partir de imagens Sentinel-2 Surface *Reflectance Harmonized* no Google Earth Engine (GEE), utilizando dados de janeiro a dezembro de 2024. Foi aplicada máscara de qualidade com base na *Scene Classification Layer* (SCL) (Main-Knorn *et al*., 2018; Raiyane *et al*., 2021). A composição temporal foi gerada pela mediana anual e, a partir dela, foram calculados o NDVI e o PRI ajustado (sPRI), combinados para derivar o CO_2flux (CO_2flux = NDVI × sPRI), posteriormente suavizado por filtro de média focal. O CO_2flux por fragmento foi sintetizado por meio de estatísticas zonais (média, desvio padrão, mínimo e máximo), sendo o valor médio adotado como variável dependente. Como variáveis independentes, foram utilizadas métricas dos fragmentos florestais, incluindo área (ha, transformada em escala logarítmica) e classe de tamanho. A relação entre as variáveis foi modelada no software R por meio do algoritmo *Random Forest* (pacote randomForest), com divisão dos dados em conjunto de treino (70%) e teste (30%). O desempenho do modelo foi avaliado no conjunto de teste por meio do coeficiente de determinação (R^2), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro absoluto médio (MAE).

Resultados e Discussão

Foram identificados 1.232 fragmentos nas UCs de PI, totalizando 119.731,48 ha, e 11.479 fragmentos nas UCs de US com um total de 436.418,90 ha. Em ambas as categorias de manejo, a paisagem é predominantemente composta por fragmentos muito pequenos (<5 ha) (Figura 2), evidenciando elevado grau de fragmentação da cobertura florestal.

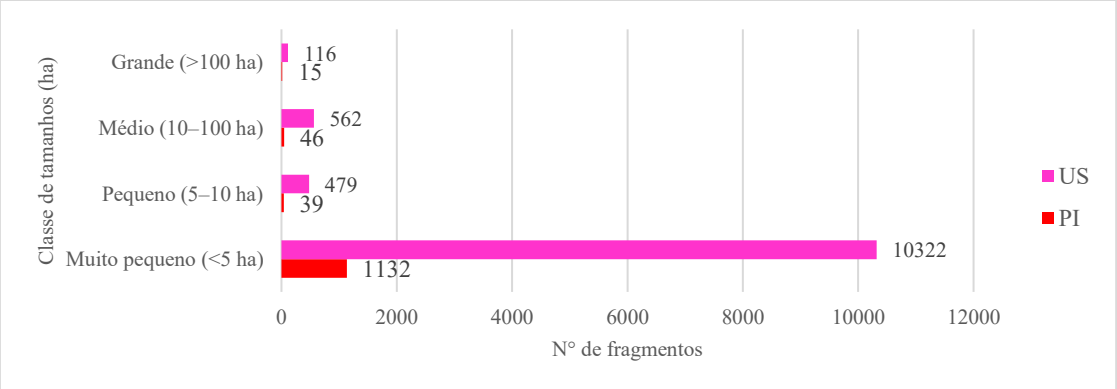


Figura 02: Classe de tamanho dos fragmentos das Unidades de Conservação de Proteção Integral e Uso Sustentável do sul da Bahia. Fonte: Autoria Própria (2026).

Nas UCs de PI, 91,88% dos fragmentos correspondem à classe muito pequena, seguidos por fragmentos pequenos (3,17%), médios (3,73%) e grandes (1,22%). Nas UCs de US, observa-se semelhança, com 89,92% de fragmentos muito pequenos, 4,17% pequenos, 4,90% médios e 1,01% grandes. Essa disposição espacial sugere que, embora o manejo seja restritivo principalmente nas UCs de PI (pois restringe intervenções humanas diretas), fatores históricos de mudanças de uso e cobertura

da terra anterior à criação da unidade de conservação e pressões antrópicas atuais resultam em alta fragmentação da cobertura florestal. Estudos mostram que, mesmo em áreas protegidas, fragmentos muito pequenos apresentam capacidade limitada de sustentar biodiversidade e funções ecossistêmicas, devido a efeitos de borda acentuados, alterações microclimáticas e isolamento populacional (Michalková *et al*., 2025; Mickley *et al*., 2025).

Quando analisadas as métricas da classe formação florestal, nas UCs de PI, a área dos fragmentos variou de 0,09 a 33.825,46 ha, com média de 97,18ha, conforme apresentado na Tabela 1.

Fragmento (Formação Florestal)				
Métrica	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Área (ha)	0,09	33.825,46	97,18	1.356,13
Perímetro (m)	118,79	1.379.900,80	3.681,85	48.118,16
Relação (perímetro/área) (adm.)	14,81	1.346,94	909,38	390,10
Dimensão fractal (adm.)	1,00	1,31	1,05	0,06
Índice de forma (adm.)	1,00	18,75	1,32	0,88

Tabela 1: Métricas das UC Proteção Integral do sul da Bahia. Fonte: Autoria Própria (2026).

O elevado desvio padrão (1.356,13ha) indica grande variabilidade no tamanho dos fragmentos, refletindo uma distribuição heterogênea da cobertura florestal, caracterizada pela predominância de fragmentos pequenos e pela ocorrência de poucos fragmentos de grande extensão, característico de paisagens fragmentadas. Estudo de Zou *et al*. (2025) que utilizaram métricas como área média e densidade de fragmentos em florestas tropicais e temperadas, evidenciou que elevados valores de desvio padrão refletem forte heterogeneidade estrutural da paisagem, com predominância de fragmentos pequenos e poucos remanescentes extensos, característica de ambientes altamente fragmentados.

A análise da configuração espacial também mostrou variação na forma dos fragmentos, uma vez que a relação perímetro/área apresentou média de 909,38. Esse resultado indica que os fragmentos apresentam elevada complexidade de forma e predominância de bordas em relação à sua área. Consequentemente, maior suscetibilidade aos efeitos de borda, como variações microclimáticas mais intensas, maior incidência de vento e luz e redução da umidade interna. Ademais, esses fragmentos tendem a apresentar menor capacidade de manutenção de condições ambientais estáveis no interior da vegetação, podendo assim comprometer espécies mais sensíveis às alterações ambientais típicas de áreas de borda (Michalková *et al*., 2025; Noble *et al*., 2025). Por outro lado, a dimensão fractal média (1,05) e o índice de forma médio (1,32) indicam predominância de fragmentos com formas geométricas relativamente simples. De acordo com Peptenatu *et al*. (2023), valores baixos de dimensão fractal estão associados a formas mais compactas e euclidianas, enquanto valores mais elevados indicam maior irregularidade. Nesse contexto, a geometria simplificada tende a refletir o histórico de conversão da paisagem, em que fragmentos moldados por atividades humanas tendem a apresentar formas simples, com bordas retilíneas e regulares associadas a estradas, propriedades rurais e limites urbanos.

Nas UCs de US, a área dos fragmentos variou entre 0,09ha e 150.538,20ha, com média de 38,02ha, evidenciando predominância de fragmentos de menor dimensão quando comparados às UCs de PI (Tabela 2).

Fragmento (Formação Florestal)				
Métrica	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Área (ha)	0.09	150.538,20	38,02	1.670,85
Perímetro (m)	118,79	6.907.403,41	3.131,38	97.911,29
Relação (perímetro/área) (adm.)	9,31	1.346,94	849,31	391,63
Dimensão fractal (adm.)	1,00	1,40	1,06	0,06
Índice de forma (adm.)	1,00	59,80	1,37	1,10

Tabela 2: Métricas das UCs de Uso Sustentável do sul da Bahia. Fonte: Autoria Própria (2026).

O desvio padrão elevado (1.670,85ha) também evidenciou grande variação no tamanho dos fragmentos. Já a relação perímetro/área média foi de 849,31, enquanto a dimensão fractal média (1,06) e o índice de forma médio (1,37) mostrando predominância de fragmentos com formas relativamente simples, embora os valores máximos elevados revelem a ocorrência pontual de fragmentos mais irregulares.

As métricas apresentadas evidenciam padrões distintos de configuração espacial da formação florestal entre as UCs de PI e US. Embora ambas as categorias apresentem predominância de fragmentos muito pequenos e formas geometricamente simples, as UCs de PI apresentaram fragmentos com área média superior (97,18 ha), o que reflete o regime mais restritivo de manejo, que limita intervenções humanas diretas e favorece a manutenção de fragmentos de maior extensão. Por outro lado, as UCs de US apresentaram maior variabilidade no tamanho dos fragmentos (desvio padrão de 1.670,85 ha), indicando uma distribuição espacial mais heterogênea, consistente com a maior diversidade de usos do solo permitidos nessa categoria de UC. Essas diferenças reforçam que a categoria de manejo, embora não seja o único determinante, exerce influência sobre a estrutura espacial dos remanescentes florestais.

A elevada proporção de fragmentos muito pequenos (<5 ha) identificada nas UCs do sul da Bahia traz implicações diretas para a conservação da biodiversidade. Fragmentos com área reduzida apresentam capacidade limitada de sustentar espécies, especialmente aquelas com maiores requisitos territoriais, sendo mais vulneráveis a efeitos de borda e alterações microclimáticas (Gonçalves-Souza *et al*., 2025; Mickley *et al*., 2025). Estudos conduzidos na Mata Atlântica demonstram que a fragmentação reduz a riqueza de espécies que dependem dos fragmentos, mesmo em áreas formalmente protegidas, com impactos mais severos em grupos funcionais especializados (Mickley *et al*., 2025; Michalková *et al*., 2025). Além disso, a predominância de fragmentos isolados e de pequenas dimensões compromete o turnover (substituição) de espécies entre fragmentos, limitando os efeitos de resgate e reduzindo a diversidade regional (Gonçalves-Souza *et al*., 2025).

A fragmentação florestal identificada nas UCs tem implicações que se estendem além da perda imediata de biodiversidade, afetando diretamente a resiliência da vegetação às mudanças climáticas. Fragmentos de pequena extensão (<5 ha), que correspondem a mais de 89% dos remanescentes em ambas as categorias, apresentam menor capacidade de tamponar variações microclimáticas extremas, como aumentos de temperatura, redução de umidade e intensificação de ventos em comparação a fragmentos contínuos de grande extensão (Yang *et al*., 2025; Haddad *et al*., 2015). A reduzida razão interior/borda nesses fragmentos amplifica a exposição ao chamado efeito de borda climático, comprometendo a estabilidade térmica e hídrica necessária à manutenção de espécies sensíveis.

A Tabela 3 apresenta a variação do fluxo médio de CO_2 em função da classe de tamanho dos fragmentos florestais nas UCs.

Proteção Integral			
Classe (ha)	**Área média (ha)**	**CO_2flux médio**	**Desvio Padrão**
<5	0.62	0.27	0.03
5-10	6.88	0.29	0.03
10-100	29.18	0.30	0.02
>100	7861	0.32	0.01
Uso Sustentável			
Classe (ha)	**Área média (ha)**	**CO_2flux médio**	**Desvio Padrão**
<5	0.72	0.27	0.05
5-10	7.00	0.29	0.04
10-100	29.53	0.30	0.03
>100	3541.39	0.30	0.02

Tabela 3: Variação do fluxo médio de CO_2 (CO_2flux) em função da classe de tamanho dos fragmentos florestais em áreas de Proteção Integral e Uso Sustentável. Fonte: Autoria Própria (2026).

Quanto ao potencial de assimilação de carbono pelos fragmentos florestais, observa-se baixa variação entre as classes de tamanho dos fragmentos em ambas as categorias de manejo. Nas UCs de PI, os valores variaram de 0,27 em fragmentos menores que 5ha a 0,32 em fragmentos superiores a 100ha, uma diferença de 0,05. Padrão semelhante é observado nas UCs de US, cujos valores variam entre 0,27 e 0,30. Embora se verifique uma tendência de aumento do fluxo de carbono com o incremento da área dos fragmentos, essa variação é pouco expressiva, indicando que o tamanho e o tipo de categoria de UC, isoladamente, possui baixa capacidade explicativa sobre o potencial de assimilação de carbono nessas paisagens.

Os modelos de aprendizado de máquina confirmam essa tendencia, dado o baixo poder explicativo (R^2 = 0,08 para Proteção Integral e R^2 = 0,09 para Uso Sustentável). Esse resultado contrasta com a condição de elevada fragmentação dos fragmentos florestais previamente identificados, marcada pela predominância de pequenos fragmentos e pela intensa influência de borda, fatores geralmente associados à redução da funcionalidade ecológica (Nunes *et al*., 2023).

Estratégias de restauração voltadas à ampliação e à conectividade dos fragmentos mostram-se pertinentes nas Unidades de Conservação, uma vez que a complexidade observada na dinâmica ecossistêmica indica que a avaliação dos efeitos da fragmentação não deve se restringir à estrutura da paisagem. Torna-se, assim, relevante a incorporação de métricas complementares de conectividade, isolamento e qualidade do habitat, associadas a variáveis biofísicas da vegetação.

De forma integrada, os resultados reforçam que abordagens baseadas exclusivamente em métricas espaciais apresentam limitações para representar os processos ecológicos associados ao funcionamento da paisagem, incluindo aqueles relacionados ao ciclo do carbono, sugerindo a necessidade de integração de outras variáveis, de diferentes fontes de dados, como os derivados de índices espectrais de imagens de satélites orbitais.

Conclusão

Os resultados indicam que a paisagem das UCs se encontra altamente fragmentada, com predominância de fragmentos de pequenas dimensões, inferiores a 5ha, em ambas as categorias de unidades de conservação. As métricas analisadas também apontam para a presença de fragmentos com formas geometricamente simples, o que reflete a influência histórica de pressões antrópicas sobre a paisagem, como desmatamento e conversão de uso da terra.

No que se refere ao potencial de assimilação de carbono, a variabilidade entre as classes de tamanho de fragmentos é pouco representativa e sugere que esse processo não responde de forma direta ao aumento da área dos fragmentos nas condições analisadas, nem à categoria de manejo das UCs.

Dessa forma, aponta-se como pertinente a incorporação de outras variáveis derivadas de índices espectrais de imagens de satélites orbitais, os quais representam a condição da vegetação e o vigor do dossel, que, quando complementados por outras métricas de paisagem, como a proximidade entre fragmentos, áreas de núcleo e densidade de borda, podem ampliar a compreensão da dinâmica de assimilação de carbono em paisagens fragmentadas.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil, processo nº 2025/23219-5, e contou com o apoio técnico e científico do Instituto de Ciência e Tecnologia – Câmpus de Sorocaba.

Referências Bibliográficas

AMARAL, Silvana *et al*. Alarming patterns of mature forest loss in the Brazilian Atlantic Forest. **Nature Sustainability**, v. 8, n. 3, p. 256-264, 2025. https://doi.org/10.1038/s41893-025-01508-w

ARRUDA, Vera Laísa *et al*. Assessing four decades of fire behavior dynamics in the Cerrado biome (1985 to 2022). **Fire Ecology**, v. 20, n. 1, p. 64, 2024. https://doi.org/10.1186/s42408-024-00298-4

BOMFIM, M. B. S; BENFICA, N. S; FREITAS, R. M. O; BARCELOS, E. A. S. Atividades antrópicas em áreas de proteção da mata atlântica: uma análise da cobertura, uso do solo e presença de fogo no sul da Bahia. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 24, n. 91, p. 333–345, 2023. https://doi.org/10.14393/RCG249161457

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 19 jul. 2000.

COLMAN, Carina Barbosa *et al*. A modelagem da mudança no uso da terra no Cerrado brasileiro destaca a necessidade de considerar o tamanho das propriedades privadas para a conservação da biodiversidade. **Scientific Reports** , v. 14, n. 1, p. 4559, 2024. https://doi.org/10.1038/s41598-024-55207-1

EWERS, Robert M.; BANKS-LEITE, Cristina. Fragmentation impairs the microclimate buffering effect of tropical forests. **PLOS one**, v. 8, n. 3, p. e58093, 2013. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0058093

GARBULSKY, Martín F. *et al*. The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies: A review and meta-analysis. **Remote sensing of environment**, v. 115, n. 2, p. 281-297, 2011. https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.023

GONÇALVES-SOUZA, Thiago *et al*. Species turnover does not rescue biodiversity in fragmented landscapes. **Nature**, v. 640, n. 8059, p. 702-706, 2025. https://doi.org/10.1038/s41586-025-08688-7

HADDAD, Nick M. *et al*. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. **Science advances**, v. 1, n. 2, p. e1500052, 2015. https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052

IUCN. International Union for Conservation of Nature. Effective protected áreas. Disponível em: https://iucn.org/our-work/topic/effective-protected-areas. Acesso em 27 de mar. 2026.

YANG, Gayoung *et al*. Um efeito negativo globalmente consistente da borda na biomassa florestal acima do solo. **Nature Ecology & Evolution** , v. 9, n. 11, p. 2036-2045, 2025. https://doi.org/10.1038/s41559-025-02840-2

YUAN, Rongyan; ZHANG, Ning; ZHANG, Qing. The impact of habitat loss and fragmentation on biodiversity in global protected areas. **Science of the Total Environment**, v. 931, p. 173004, 2024. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173004

JUSTINO, Sérvio Túlio Pereira *et al*. Monitoramento da degradação ambiental e mudanças espaciais na vegetação e nos recursos hídricos no Pantanal brasileiro. **Sustentabilidade** , v. 17, n. 1, p. 51, 2024. https://doi.org/10.3390/su17010051

LINERO-TRIANA, Daniela; CORREA-AYRAM, Camilo Andrés; VELÁSQUEZ-TIBATÁ, Jorge. Prioritizing ecological connectivity among protected areas in Colombia using a functional approach for birds. **Global Ecology and Conservation**, v. 48, p. e02713, 2023. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02713

LIU, Li *et al*. Land use and landscape pattern changes dominated ecosystem service trade-offs and synergies in a temperate mountain region. **Forest Ecosystems**, p. 100427, 2026. https://doi.org/10.1016/j.fecs.2026.100427

MA, Shuai *et al*. Direct and indirect effects of agricultural expansion and landscape fragmentation processes on natural habitats. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 353, p. 108555, 2023. https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108555

MAIN-KNORN, Magdalena *et al*. Sen2Cor for sentinel-2. In: **Image and signal processing for remote sensing XXIII**. SPIE, 2017. p. 37-48. https://doi.org/10.1117/12.2278218

MATOS, Ana Paula *et al*. Accounting for alternation in temporal quality analysis in MapBiomas Brazil. **International Journal of Digital Earth**, v. 18, n. 1, p. 2528604, 2025. https://doi.org/10.1080/17538947.2025.2528604

MEZA-ELIZALDE, María C.; ARMENTERAS-PASCUAL, Dolors. Edge influence on the microclimate and vegetation of fragments of a north Amazonian forest. **Forest Ecology and Management**, v. 498, p. 119546, 2021. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119546

MICHALKOVÁ, Michaela *et al.* Dissimilarity, nestedness, and turnover patterns in vegetation at the edge and in the core of lowland forest habitats. **Plant Ecology**, v. 226, n. 6, p. 645–659, 16 jun. 2025. https://doi.org/10.1007/s11258-025-01520-2

MICKLEY, James G. *et al*. Underrepresentation of dietary-specialist larval Lepidoptera in small forest fragments: Testing alternative mechanisms. **Journal of Animal Ecology,** v. 94, n. 4, p. 786–799, 27 abr. 2025. https://doi.org/10.1111/1365-2656.70020

MOTA, F. M. M. *et al*. Climate change is expected to restructure forest frugivorous bird communities in a biodiversity hot-point within the Atlantic Forest. **Diversity and Distributions,** v. 28, n. 12, p. 2886-2897, 2022. https://doi.org/10.1111/ddi.13602

NOBLE, Ciar D.; GILROY, James J.; PERES, Carlos A. Small Forest patches and landscape-scale fragmentation exacerbate forest fire prevalence in Amazonia. **Journal of Environmental Management**, v. 375, p. 124312, fev. 2025. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124312

NUNES, Matheus Henrique *et al*. Edge effects on tree architecture exacerbate biomass loss of fragmented Amazonian forests. **Nature Communications**, v. 14, n. 1, p. 8129, 2023. https://doi.org/10.1038/s41467-023-44004-5

PEPTENATU, Daniel *et al*. A new fractal index to classify forest fragmentation and disorder. **Landscape Ecology**, v. 38, n. 6, p. 1373–1393, 7 jun. 2023. https://doi.org/10.1007/s10980-023-01640-y

PINHEIRO, C. M; PINHEIRO, J. M. G. Diagnóstico da fragmentação florestal da bacia do rio Buranhém–extremo-sul da Bahia: métricas e conectividade da paisagem. **Revista Ciência Geográfica**, v. 28, n. 2, p. 407-416, 2024.

RAIYANI, Kashyap *et al*. Sentinel-2 image scene classification: A comparison between Sen2Cor and a machine learning approach. **Remote Sensing**, v. 13, n. 2, p. 300, 2021. https://doi.org/10.3390/rs13020300

RAMOS, E. A; NUVOLONI, F. M; LOPES, E. R. N. Landscape Transformations and loss of Atlantic Forests: challenges for conservation. **Journal for Nature Conservation,** v. 66, p. 126152, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126152

REYES-MUÑOZ, Pablo *et al*. Inferring global terrestrial carbon fluxes from the synergy of Sentinel 3 & 5P with Gaussian process hybrid models. **Remote Sensing of Environment**, v. 305, p. 114072, 2024. https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114072

RIBEIRO, M. P *et al*. Impacts of urban landscape pattern changes on land surface temperature in Southeast Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment,** v. 33, p. 101142, 2024. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101142

SANTOS, Jeangelis Silva *et al*. Delimitation of ecological corridors in the Brazilian Atlantic Forest. **Ecological Indicators**, v. 88, p. 414-424, 2018. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.011

SEI. **Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia.** Disponível em:https://sei.ba.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=2289&Itemid=265&lang=p t. Acesso em

17 de mar. 2026.

SIQUEIRA-GAY, Juliana; SÁNCHEZ, Luis E. The outbreak of illegal gold mining in the Brazilian Amazon boosts deforestation. **Regional environmental change**, v. 21, n. 2, p. 28, 2021. https://doi.org/10.1007/s10113-021-01761-7

SOUSA, T. S. *et al*. Edge effect influences the ecological strategies of plant communities in tropical forest fragments. **Plant**

Biology, v. 28, n. 2, p. 509-519, 2026. https://doi.org/10.1111/plb.70137

SOUZA JÚNIOR, C. M. *et al*. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. Remote **Sensing,** v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. https://doi.org/10.3390/rs12172735

VANCINE, Maurício Humberto *et al*. The Atlantic Forest of South America: spatiotemporal dynamics of the vegetation and implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 291, p. 110499, 2024. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2024.110499

VAN JAARSVELD, Barry; HAUSWIRTH, Sandra M.; WANDERS, Niko. Machine learning and global vegetation: random forests for downscaling and gap filling. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 28, n. 11, p. 2357-2374, 2024. https://doi.org/10.5194/hess-28-2357-2024

VIEIRA, M. N; ORNELLAS, J. L; LOPES, E. R. N. Forest fragmentation in an unregulated protected area on the Atlantic Coast of Brazil. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales.** Investigación, desarrollo y práctica, p. 1135-1148, 2022. https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.3.80643

WALDER, M. T. *et al*. Agricultural Expansion and Landscape Heterogeneity Explain Vegetation Degradation in Brazilian Atlantic Forest Landscapes. **Land Degradation & Development,** 2024. https://doi.org/10.1002/ldr.5415

XIAO, Jingfeng *et al*. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: A review of advances over 50 years. **Remote sensing of Environment**, v. 233, p. 111383, 2019. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111383

YANG, Yuting *et al*. Long-term CO_2 fertilization increases vegetation productivity and has little effect on hydrological partitioning in tropical rainforests. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences,** v. 121, n. 8, p. 2125-2140, 2016. https://doi.org/10.1002/2016JG003475

ZOU, Yibiao *et al*. Fragmentation increased in over half of global forests from 2000 to 2020. **Science**, v. 389, n. 6765, p. 1151–1156, 11 set. 2025. https://doi.org/10.1126/science.adr6450.

A AVALIAÇÃO DAS VARIAÇÕES TEMPORAIS DAS ALTITUDES NAS ESTAÇÕES IHRF UTILIZANDO DADOS GRACE/GRACE-FO E GNSS

1 Leticia Rodovalho Rodrigues, 2 Gabriel do Nascimento Guimarães
1 Universidade Federal de Uberlândia - UFU, e-mail: leticia.rodovalho@ufu.br; 2 Universidade Federal de Uberlândia - UFU, e-mail: gabriel@ufu.br

Palavras-chave: Altitudes; séries temporais; geodésia.

Resumo

O estudo e a compreensão dos aspectos geodinâmicos no planeta requerem referenciais geodésicos globais com uma ordem de acurácia melhor do que a magnitude dos efeitos e com consistência e confiabilidade. A Associação Internacional de Geodésia é a responsável pela infraestrutura geodésica para o monitoramento do sistema Terra. Neste sentido, a definição, a realização e a manutenção de um Sistema Internacional de Referência para Altitudes tem sido um dos desafios atuais para a Geodésia. Para a implantação de uma rede de referência para altitudes, o Brasil conta com seis estações. Face ao exposto, a hipótese principal do trabalho foi fundamentada na possibilidade de quantificar, a partir de informações satelitais, as variações das altitudes das seis estações no Brasil. Para testar a hipótese, foram utilizadas séries temporais das estações GNSS das seis estações, bem como dados das missões GRACE/GRACE-FO, o que permitiu determinar as variações temporais do quase geoide na região de estudo e as mudanças dependentes do tempo da altitude elipsoidal (derivadas do GNSS) induzidas pelo carregamento de massa temporal nesses locais.

Introdução

A implementação de sistemas de referência altimétrica de alta precisão é fundamental para diversas aplicações em geociências e engenharia, especialmente em um país como o Brasil, onde a diversidade geográfica e climática influencia significativamente as medições. Em 2015, a Associação Internacional de Geodesia (IAG) propôs a criação de um Sistema Internacional de Referência de Altura (IHRS), com o objetivo de unificar os datums verticais globais e melhorar a precisão das medidas altimétricas (Drewes et al., 2016). A instalação de Estações de Referência para o IHRS (IHRF) em locais estratégicos é essencial para monitorar as variações temporais das alturas ortométricas e normais, que são afetadas por fatores como a dinâmica da crosta terrestre e as variações hidrológicas (Sánchez et al., 2019).

Essas variações são fortemente influenciadas por mudanças nas massas de água, que geram alterações no potencial gravitacional e provocam deformações na superfície da Terra (Godah et al., 2020). Estudos demonstraram que as mudanças nas alturas ortométricas podem ser significativas, com variações que podem alcançar até 81 mm em áreas com forte sinal hidrológico, como as bacias da Amazônia (Godah et al., 2020). Nesse contexto, a IAG desempenha um papel crucial ao fornecer a infraestrutura necessária para o monitoramento do sistema Terra, especialmente na definição e manutenção de um Sistema Internacional de Referência para Altitudes. Essa interconexão entre a instalação de IHRF e a compreensão geodinâmica sustenta a importância de um sistema robusto e integrado para o futuro das medições altimétricas.

Entretanto, as variações nas massas hidrológicas geram desafios significativos para a precisão altimétrica, afetando grandes bacias fluviais que cobrem vastas áreas terrestres. As missões *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) e GRACE *Follow-On* (GRACE-FO) têm se mostrado indispensáveis ao fornecer dados sobre as variações temporais das massas de água, permitindo a avaliação das deformações da superfície terrestre. Esses dados são vitais para quantificar alterações no geoide e analisar as variações de altura ortométrica e normal ($\Delta H/\Delta H^*$), resultantes do carregamento de massa temporal (Godah et al., 2020).

No Brasil, a implantação de uma rede de referência para altitudes é respaldada por seis estações GNSS estrategicamente localizadas. Esses pontos de referência são fundamentais para testar a hipótese central deste trabalho, que propõe que a partir de informações satelitais é possível quantificar as variações das altitudes nessas estações. A análise das séries temporais das estações, juntamente com os dados das missões GRACE/GRACE-FO, permitirá determinar as variações temporais do geoide na região de estudo e as mudanças dependentes do tempo na altitude elipsoidal, derivadas do GNSS.

Diante desse cenário, a questão central que permeia esta pesquisa é a análise do impacto das variações nas massas de água sobre as altitudes em estações GNSS no Brasil, bem como as implicações dessas variações na precisão das medições altimétricas. A hipótese a ser explorada propõe que, se as variações de massa de água forem quantificadas com precisão, as alterações nas altitudes observadas nas estações GNSS poderão ser atribuídas de forma mais acurada a esses fenômenos hidrológicos. Essa investigação não apenas enriquece o entendimento geodinâmico, mas também possui relevância prática em áreas como o monitoramento de mudanças climáticas e a gestão de recursos hídricos.

Área de estudo

Representado pela Figura 1a, o International Height Reference Frame (IHRF) é um conjunto de cerca de 170 estações (Sánches et al., 2021) materializado pelo Global Navegation Satellite System (GNSS) operando continuamente a estações de monitoramento. No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) selecionou seis estações (CEFT, MABA, BRAZ, CUIB, PPTE E SCIM) (Figura 1b) para compor a primeira solução para o IHRF (Guimarães et al., 2022).

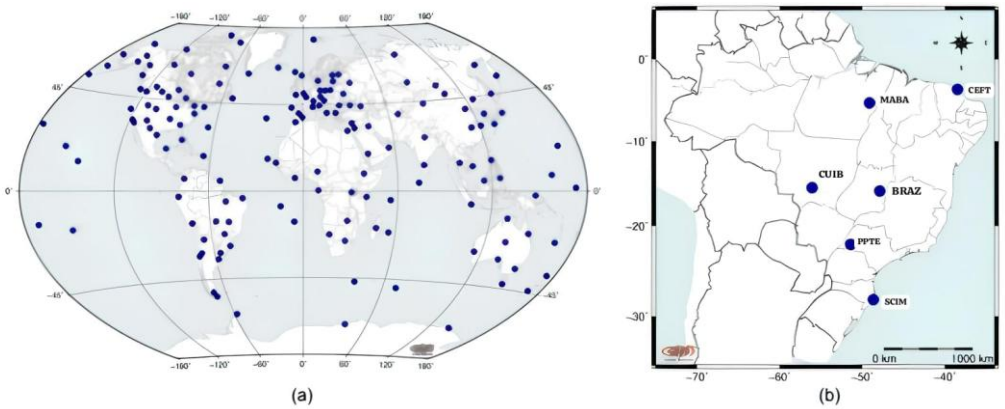


Figura 1: a) Distribuição das estações IHRF no planeta e b) no Brasil.
Fonte: Adaptado de Sánchez et al. (2021)

Material e Métodos

Os dados das estações GNSS foram obtidos a partir de informações disponibilizadas pelo Centro de Análise do Instituto de Pesquisa Geodésica Alemão da Universidade Técnica de Munique - DGFI-TUM. O período dos dados variou de 2000 a 2024, conforme disponibilidade para cada uma das estações (Tabela 1).

ESTAÇÃO	LATITUDE	LONGITUDE
BRAZ	-15.9474729	-47.8778697
CEFT	-3.7108093	-38.4729186
CUIB	-15.5552607	-56.0698671
SCIM	-28.2348371	-48.6557221
MABA	-5.3623762	-49.1222984
PPTE	-22.1199024	-51.4085346

Tabela 1: Coordenadas Geográficas das estações IHRF no país.
Fonte: Os autores, 2025.

Os dados da ondulação geoidal (N) da missão GRACE foram obtidos por meio do Centro Internacional para Modelos Globais Terrestres (ICGEM - *International Centre for Global Earth Models*) (Figura 2), uma iniciativa dedicada à coleta, arquivamento e disseminação de modelos globais de campo gravitacional. Este centro reúne diversos modelos, permitindo o acesso centralizado a esses dados, além de oferecer uma interface web onde os usuários podem visualizar os modelos e analisar suas variações e diferenças ao longo do tempo. O intervalo dos dados coletados foi de 2000 a 2024.



Figura 2: Imagem da plataforma ICGEM.
Fonte: ICGEM, 2025.

As variações temporais das altitudes ortométricas/normais (ΔH/ΔH*) foram obtidas por meio dos Modelos Geopotenciais Globais (GGMs) baseado nos dados do GRACE (Godah et al. 2020). Para a determinação dos locais estratégicos da IHRF, que representa o conjunto de estações geodésicas que materializam a componente altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro.

As variações temporais das altitudes ortométricas e normais (ΔH/ΔH*) foram determinadas utilizando Modelos Geopotenciais Globais (MGG) derivados dos dados da missão GRACE (Godah et al. 2020). Para a identificação de locais estratégicos para a (IHRF), que constitui a materialização da componente altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro, realizou os seguintes cálculos:

$\Delta H = \Delta N - \Delta h$ {Para altitudes ortométricas} (1)

$\Delta H * = \Delta h - \Delta \zeta$ {Para altitudes normais} (2)

$\Delta h = \Delta h^{G} - \Delta h^{SG} + \Delta h^{SGIA}$ (3)

Em que:

Δh é a deformação vertical da superfície da Terra;

ΔN é a variação da ondulação geoidal;

$\Delta \zeta$ é a variação temporal do quase geoide;

Δh^{G} é a mudança da altitude elipsoidal determinada pela missão GRACE;

Δh^{SG} é a variação secular da altitude elipsoidal e da anomalia de altura;

Δh^{SGIA} é a variação do ajustamento isostático glacial.

Os dados das estações GNSS foram baixados no site do Instituto de Pesquisa Geodésica Alemão da Universidade Técnica de Munique - DGFI-TUM. Posteriormente, foram organizados em planilhas no Excel, onde foram realizados os cálculos de Δh de acordo com a data civil semanal e Δh de acordo com a data mensal. Para o cálculo de Δh segundo a data civil semanal, a operação realizada foi a subtração da altitude elipsoidal pela média. Para o cálculo de Δh de acordo com a data mensal, foi utilizada a inteligência artificial (IA).

Um arquivo no Excel foi preparado, contendo uma coluna com a data civil semanal e outra com o valor de Δh. Esse arquivo foi anexado à IA Deepseek (https://chat.deepseek.com/) com a solicitação: "Faça a média mensal dos valores da segunda coluna de acordo com o mês de cada ano." Os resultados mensais foram inseridos na planilha do Excel, permitindo a construção dos gráficos de cada estação e da variação da componente vertical.

Os dados da ondulação geoidal (N) da missão GRACE foram obtidos no site do ICGEM. A metodologia para a coleta dos dados consistiu na utilização de um software denominado “PlotDigitizer”. Inicialmente, foram selecionadas as coordenadas de ‘referência no ICGEM. A imagem do gráfico foi importada no software, onde os pontos clicados permitiram a extração do valor da ondulação em variados períodos do ano. Os resultados obtidos foram copiados e colados em um bloco de notas para posterior inserção no Excel (data semanal, altitude e ΔN).

Utilizando a IA Deepseek, a data semanal foi convertida para data mensal. Para encontrar o valor de Δh, também foi utilizada essa IA, com um arquivo no Excel contendo uma coluna com a data civil semanal e outra com o valor de Δh. O arquivo foi anexado à IA com a solicitação: "Faça a média mensal dos valores da segunda coluna de acordo com o mês de cada ano." Com os valores mensais de Δh e a data mensal, foi possível calcular ΔH, solicitando à IA: “Faça a subtração de Δh menos ΔN, considerando que a subtração deve ocorrer apenas com as datas coincidentes.”

Através da manipulação dos dados das estações GNSS, foram elaborados gráficos de cada estação, que podem ser comparados com os gráficos disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos a partir da análise dos dados das estações GNSS MABA, SCIM, PPTE, BRAZ, CEFT e CUIB demonstraram variações significativas nas altitudes normais ao longo do período de estudo. Através da integração dos dados provenientes das missões GRACE/GRACE-FO, foi possível identificar claramente como as flutuações nas massas de água influenciam essas medições.

Os gráficos gerados (Figuras 3 a 8) refletem as variações temporais das altitudes em cada uma das estações, evidenciando que as alterações nas massas hídricas têm impacto direto nas medições altimétricas. Observou-se que, em períodos de intensa variação hidrológica, as flutuações nas altimétricas ortométricas podem atingir valores significativos, corroborando a hipótese inicial da pesquisa. Além disso, a análise das séries temporais permitiu identificar padrões sazonais nas variações de altitude, que se correlacionam com as mudanças nos níveis de água das bacias fluviais circundantes. Esses dados não apenas reforçam a importância das estações de referência para o monitoramento contínuo, mas também destacam a necessidade de uma abordagem integrada que considere as dinâmicas hidrológicas.

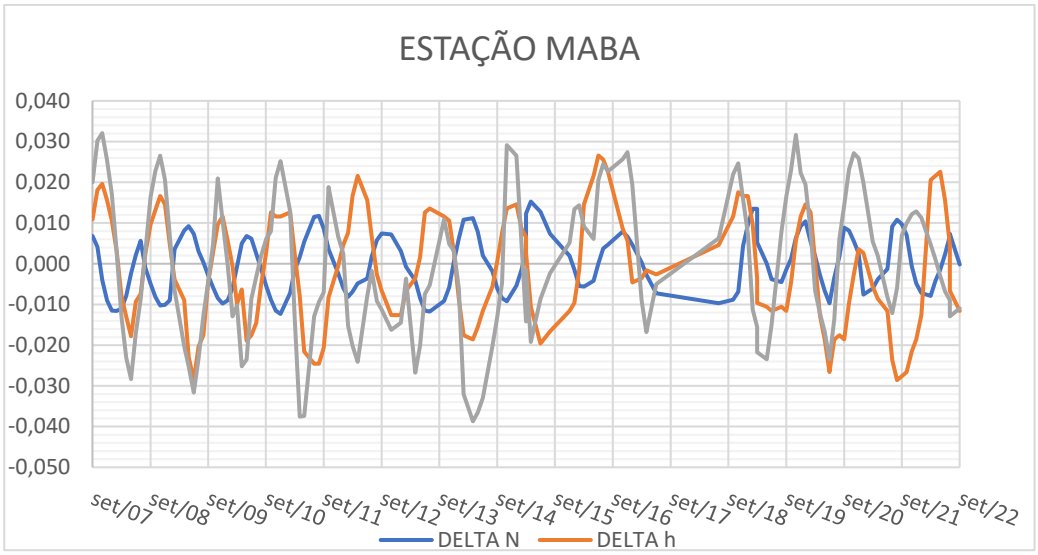


Figura 3: Estação MABA
Fonte: Os autores, 2025.

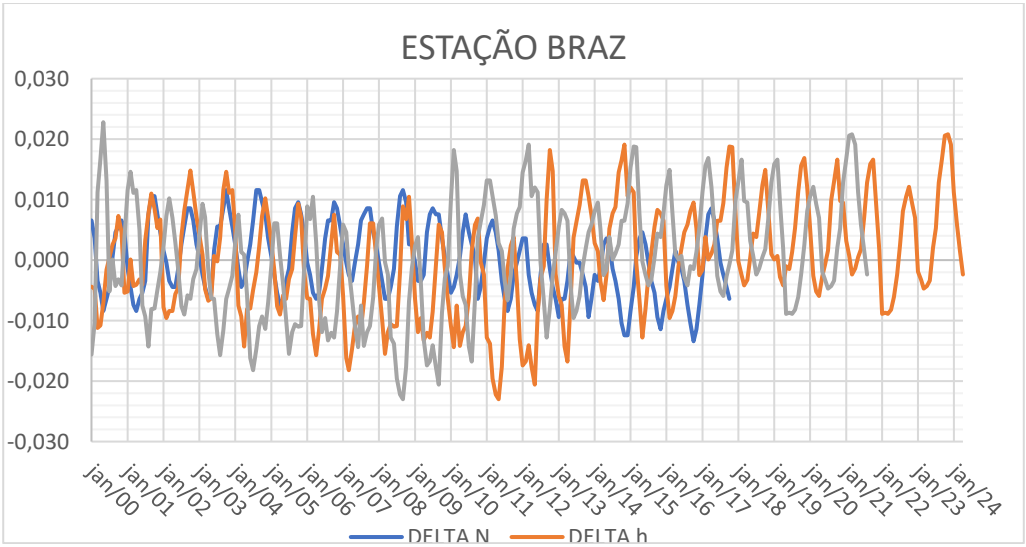


Figura 4: Estação BRAZ.
Fonte: Os autores, 2025

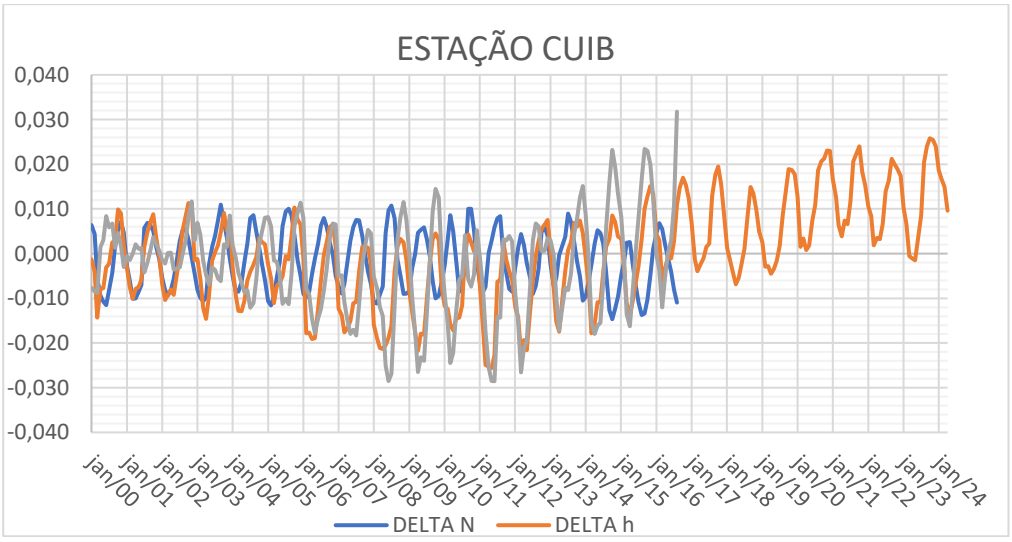


Figura 5: Estação CUIB.
Fonte: Os autores, 2025.

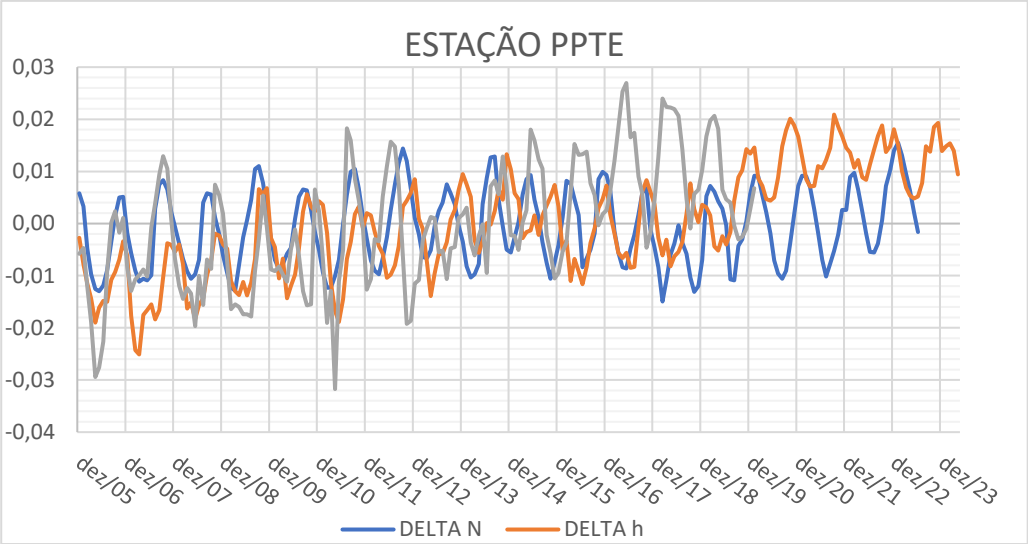


Figura 6: Estação PPTE.
Fonte: Os autores, 2025.

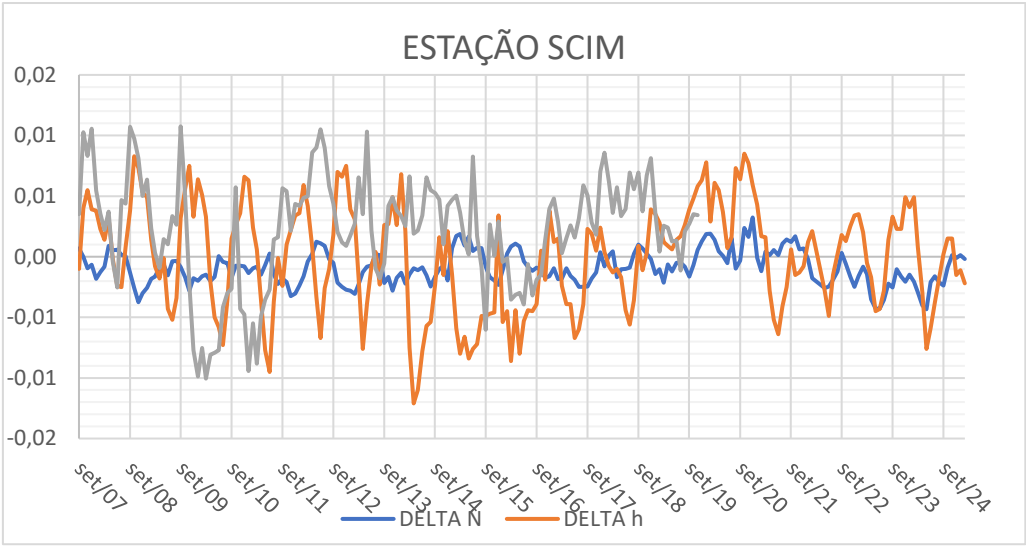


Figura 7: Estação SCIM.
Fonte: Os autores, 2025.

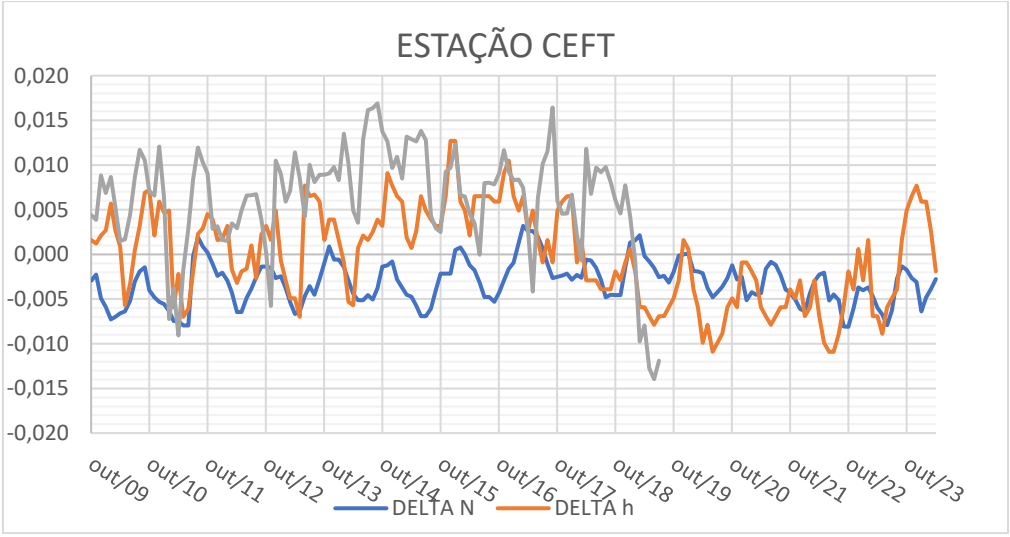


Figura 8: Estação CEFT.
Fonte: Os autores, 2025.

Considerações Finais

Este estudo evidenciou a viabilidade da quantificação das variações altimétricas nas estações do IHRF no Brasil, por meio da análise de dados provenientes de estações GNSS e das missões GRACE/GRACE-FO. Os resultados obtidos demonstraram que as flutuações nas massas de água têm um impacto significativo nas medições altimétricas, refletindo as complexas interações entre as dinâmicas hidrológicas e as variações geodinâmicas na crosta terrestre.

A pesquisa ressaltou a importância da instalação de estações de referência em locais estratégicos, não apenas para o monitoramento contínuo das alturas ortométricas e normais, mas também para a gestão eficiente dos recursos hídricos em um contexto de crescente variabilidade climática. A integração dos dados altimétricos com informações hidrológicas e geodinâmicas permite um entendimento mais profundo dos fenômenos que afetam a superfície terrestre, contribuindo para a precisão das medições altimétricas.

Assim, os resultados desta pesquisa não só enriquecem o corpo teórico das geociências, mas também possuem implicações práticas significativas para o planejamento urbano e a gestão ambiental no Brasil, promovendo um uso sustentável dos recursos naturais e uma melhor resposta aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Agradecimentos

Agradeço todo o suporte oferecido pela “Universidade Federal de Uberlândia”, o qual foi fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

Samuel Milki Yadeta, Walyeldeen Godah, Malgorzata Szelachowska & Georgia Fotopoulos (2023) Assessment of temporal variations of orthometric/normal heights at proposed International Height Reference Frame sites using GRACE/GRACE-FO, Survey Review, DOI: 10.1080/00396265.2023.2293367

Godah, W., Szelachowska, M., and Krynski, J., 2017b. On the estimation of physical height changes using GRACE satellite mission data – A case study of Central Europe. Geodesy and Cartography, 66 (2), 211–226. http://dx.doi.org/10.1515/geocart-2017-0013.

Guimarães, Gabriel do Nascimento; Mendonça, Leônidas Rodrigues. Análise da variação da crosta terrestre devido às mudanças sazonais de massa d’água no estado de Minas Gerais. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, v. 35, p. 1-14, 2021.

TRANSFORMAÇÕES NO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA REGIÃO DE INTEGRAÇÃO DE CARAJÁS (PA) ENTRE 1985 E 2024

1 Iohrana Ferreira Lopes, 2 Viviane da Silva Matos, 3 Tacila Marinho Rodrigues, 4 Maria da Conceição Rabelo Gomes

1 Universidade do Estado do Pará-UEPA, e-mail: iohrannalopes@gmail.com; 2 Universidade do Estado do Pará-UEPA, e-mail:matosviviane797@gmail.com; 3 Universidade do Estado do Pará-UEPA, e-mail: tacilamarinho9@gmail.com; 4 Universidade do Estado do Pará-UEPA, e-mail: maria.dcr.gomes@uepa.br.

Palavras-chave: Cobertura e uso da terra; Análise multitemporal; Geoprocessamento.

Resumo

A região de Integração de Carajás, localizada no sudeste do Pará, apresenta forte dinâmica territorial e econômica associada à expansão das atividades agropecuárias, mineradoras e urbanas, resultando em mudanças significativas no uso e ocupação do solo ao longo das últimas décadas. Diante disso, o objetivo deste estudo é analisar as mudanças do uso e cobertura da terra na Região de Integração de Carajás entre os anos de 1985 e 2024, utilizando dados da plataforma MapBiomas e técnicas de geoprocessamento no software QGIS. A análise evidenciou uma redução expressiva das áreas de Formação Florestal ao longo dos periodos analisados, variando de 92,74% em 1985 para 41,18% em 2024, enquanto a pastagem aumentou de forma significativa, evidenciando como a principal forma de uso do solo na região. Foi possível observar o crescimento das áreas de mineração e urbanas, porém em menor proporção. Desse modo, destaca alternativas sustentáveis de uso da terra, como os sistemas de Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e os Sistemas Agroflorestais (SAFs), que contribui para o uso sustentável do solo.

Introdução

A humanidade, ao longo da sua história evolutiva, passou por diversas transformações e com o aumento da população e o aumento da demanda por recursos naturais, surge a necessidade de ampliar a produção de alimentos, matérias-primas e áreas destinadas à agricultura, pecuária, mineração e urbanização, ocasionando na retirada da vegetação natural para uso antrópico, para assim suprir as grandes demandas da sociedade (Assennato *et al.,* 2022). Com isso, houve um grande avanço das atividades antrópicas sobre os meios naturais, impactando o solo, a água e o mosaico paisagístico.

Na Amazônia, com o processo de ocupação, gerou uma grande redução de áreas verdes, devido as ações antrópicas, para a aberturas de novas áreas para a expansão urbana, pecuarista e agrícola, que são os principais responsáveis pela supressão vegetal na Amazônia (Parente *et al*., 2021). Furtado *et al*., (2023), também afirmam que as alterações no uso e cobertura da terra na região amazônica está diretamente ligada as questões econômicas traduzidas pela exploração madeireira, extração mineral e agropecuária.

Grande parte de áreas desmatadas na Amazônia concentra-se na região conhecida como Arco do Desmatamento, caracterizada por intensas transformações no uso do solo (Ribeiro; Bourscheidt, 2024). O estado do Pará se destaca no cenário nacional em relação ao desmatamento, concentrando 26,44% da área total desmatada no país em 2020, evidenciando a intensidade das transformações ambientais na região (Azevedo *et al.,* 2021).

A Região de Integração de Carajás é um exemplo desse processo, por sua forte dinâmica economia e territorial. A região se destaca por sua atividade mineradora e a expansão da agropecuária, que são as principais causas da perda de vegetação natural (Andrade, 2021). Deste modo, é essencial compreender o uso e ocupação do solo na região, para identificar mudanças ambientais e contribuir para o planejamento territorial e ambiental da região de Carajás.

Visando o estudo do solo, o uso de tecnologias de informações ambientais é fundamental. É importante identificar e mapear as diferentes classes de uso da terra, bem como atividades desenvolvidas, a fim de analisar as dinâmicas socioambiental, visando identificar os impactos gerados e suas consequências para a saúde e bem-estar da população. Dessa forma, o mapeamento e monitoramento do uso da terra se tornam importante, pois permite avaliar e quantificar as alterações provocadas pela ação do homem sobre os recursos naturais, subsidiando ações de planejamento territorial e ambiental voltadas ao uso sustentável do solo e à melhoria da qualidade de vida da população.

Diante desse contexto, o objetivo deste estudo é avaliar como a expansão da pastagem alterou estruturalmente a paisagem da Região de Integração de Carajás entre 1985 e 2024, através de uma análise multitemporal do uso e ocupação da terra aos longos dos anos, com base em dados do MapBiomas e técnicas do geoprocessamento. Além de propor soluções sustentáveis para uma produção mais sustentável.

Material e Métodos

O estudo foi realizado na região de integração de Carajás, localizada no norte do Brasil no estado do Pará, a região abrange uma área de 44.729,35 km² e sua população estimada total é de 707.165 habitantes, constituído, portanto, com uma densidade demográfica de aproximadamente de 15,81 habitantes/km² (FAPESPA, 2021). A região é integrada por alguns municípios e tem uma grande importância econômica no cenário nacional, em especial pela atividade mineradora, a atividade agropecuária e o crescimento urbano. Em destaque os municípios de Marabá, Parauapebas e Canaã dos Carajás que tem uma forte dinâmica econômica e territorial da região.

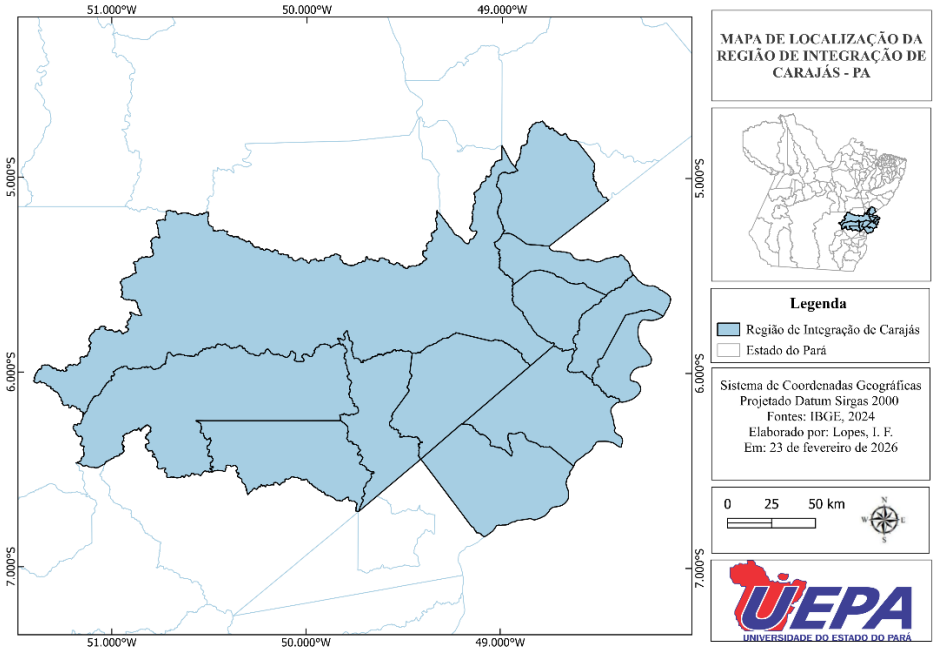


Figura 1 – Mapa de Localização da Região de Integração de Carajás
Fonte: autoras, 2026.

A região de Carajás está inserida no bioma Amazonia e é uma das principais produtoras de minério de ferro do Pará, a região reúne 12 municípios (FAPESPA, 2024). Segundo o Sindicato das Indústrias Minerais do Estado do Pará (SIMINERAL, 2022), as exportações de minérios no Pará ocuparam a primeira posição no Brasil no ano de 2021, atingindo o valor de US$ 27 bilhões, aproximadamente 35% do total nacional, à frente de outros estados brasileiros.

A Região de Integração de Carajás apresenta elevada diversidade vegetal com predominância de espécies típicas da Amazônia, como a castanheira (*Bertholletia excelsa*) e o jatobá (*Hymenaea courbaril*), frequentemente associadas às atividades de exploração madeireira. A cobertura vegetal regional é composta majoritariamente por formações de floresta ombrófila densa e floresta ombrófila aberta, características de ambientes de terra firme (Andrade, 2021).

Para a análise das mudanças do uso e ocupação da terra, foi utilizados dados do MapBiomas referente ao período de 1985 a 2024, processados no software Qgis, na versão 3.40. Foram selecionados intervalos de aproximadamente dez anos (1985, 1995, 2005, 2015 e 2024), considerando a disponibilidade da série histórica do MapBiomas até 2024, com o objetivo de realizar uma análise multitemporal das principais transformações na paisagem da Região de Integração de Carajás. Os dados utilizados foram disponibilizados pelo MapBiomas Collections, por meio do plugin integrado ao software QGIS, utilizado para a extração e análise das informações. Ademais, foi elaborado uma tabela e gráfico para a análise comparativa da evolução do uso da terra ao longo do período estudado.

Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta a dinâmica do uso e ocupação da terra na Região de Integração de Carajás ao longo do período analisado. É possível observar as principais transformações ocorridas na paisagem, com destaque para o avanço do desmatamento. Foram analisadas as mudanças no uso e ocupação da terra entre os anos de 1985 e 2024, considerando intervalos aproximados de dez anos.

A região passou por diversas transformações ao longo dos anos. A partir da década de 1980, com a implantação do Projeto Grande Carajás, intensificou as atividades econômicas na região, impulsionou a exploração mineral e a expansão de infraestrutura, como a estrada de Ferro Carajás (Fernandes, 2023). Esse processo foi muito importante para o crescimento populacional e as mudanças no uso e ocupação do solo na região. Com isso, a partir de 1985, a região passou por uma intensa ocupação, com substituição de áreas de vegetação nativa por pastagens. Posteriormente, transformando o sudeste paraense em uma nova fronteira agrícola nacional. Este avanço foi impulsionado por uma combinação de fatores estruturais, econômicos e tecnológicos.

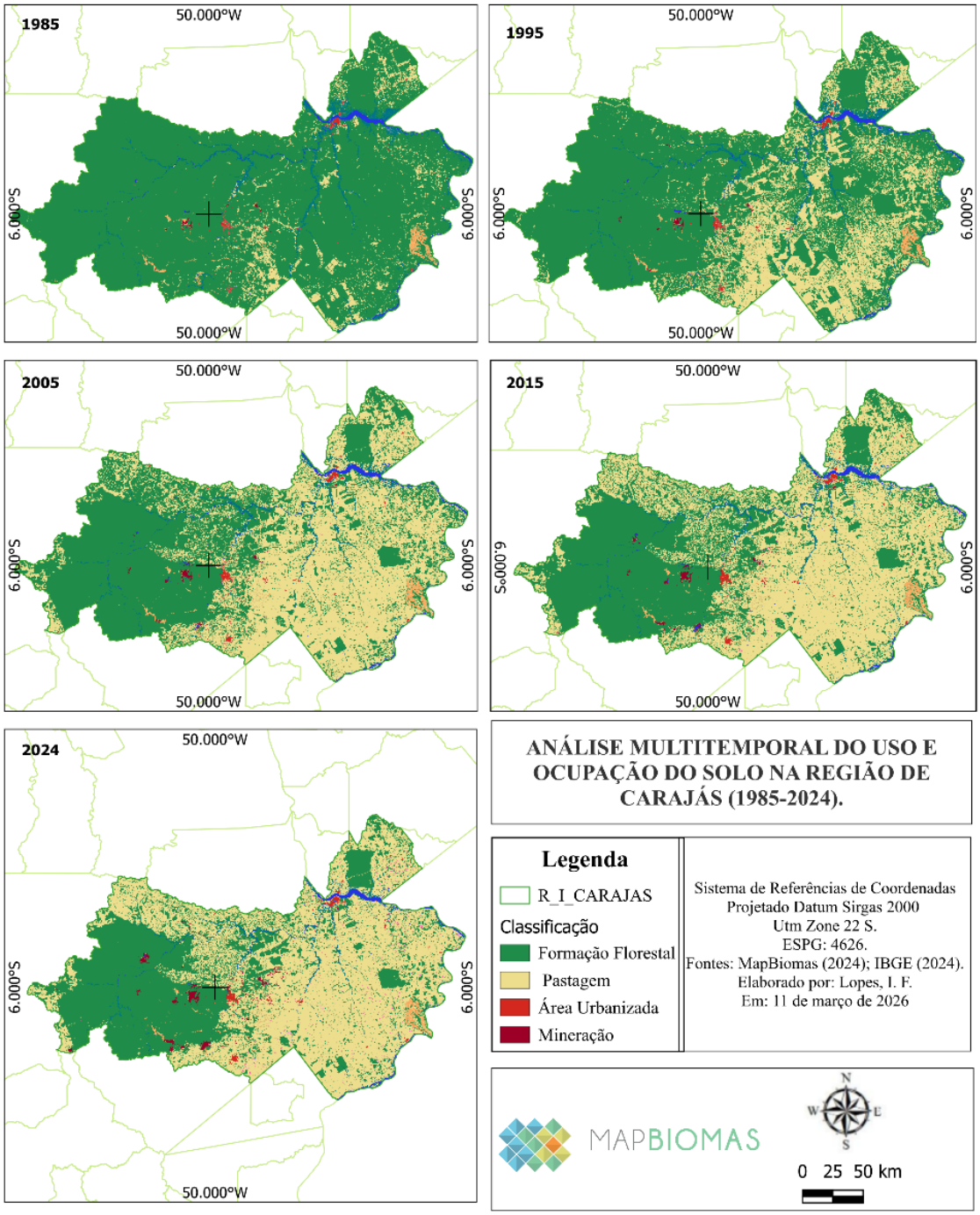


Figura 2 - Dinâmica do uso do solo na Região de Integração de Carajás
Fonte dos dados: IBGE 2024 e Mapbiomas Collection 2024.

A análise multitemporal de uso e ocupação do solo evidencia essas transformações ao longo dos anos. Observa-se que no ano de 1985, havia grande área de formação florestal, e poucas áreas de pastagem, urbanização e mineração. Dez anos depois em 1995 a pastagem começou a ocupar um grande espaço sobre as áreas de vegetação natural, evidenciando o crescimento na região. A partir do ano de 2005, a pecuária teve um avanço expressivo sobre as áreas naturais, tornando-se um vetor de transformação da paisagem na região.

No período de 2005 a 2015 a pecuária já ocupava grande parte da região, consolidando umas das principais atividades econômicas da região. No ano de 2024, essa atividade de pastagem continuou se expandindo, além de áreas urbanizadas e atividade mineraria, refletindo na consolidação da fronteira agropecuária e mineral da Região de Integração de Carajás.

A análise dos mapas nos periodos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2024 revelou como a atividade antrópica cresceu nessa região nos últimos anos. A análise mostra a tendência da atividade agropecuária na região. A tabela 1 apresenta a síntese dos resultados obtidos a partir dos dados da plataforma Mapbiomas.

Classe	1985	1995	2005	2015	2024
Formação Florestal	92,74%	72,86%	50,72%	45,78%	41,18%
Pastagem	7,07%	26,78%	48,70%	53,44%	57,63%
Mineração	0,08%	0,15%	0,22%	0,35%	0,73%
Urbanização	0,11%	0,22%	0,36%	0,43%	0,46%

Tabela 1 – Variação percentual das classes de uso e ocupação do solo na Região de Integração de Carajás entre o periodo de 1985 e 2024. Fonte: autoras, 2026.

Comparando os resultados obtidos nos dados entre os anos 1985 e 2024 (Tabela 1), constata-se a diminuição em 51,56% das áreas representadas pela classe de Formação Florestal. A classe área de pastagem aumentou mais de 8 vezes com o passar de 39 anos, assim como a mineração e a urbanização que também teve um crescimento significativo. Reafirma-se, portanto, que o processo de degradação do meio natural na Região de Carajás está associado diretamente com a atividade de pastagem, o crescimento demográfico e a atividade mineradora. É possível observar na figura 3 a expressiva redução da cobertura florestal na região. Em 1985 a predominância era a cobertura vegetal em grande parte da região, já em 2024 é evidente a grande fragmentação da vegetação nativa e expansão de áreas antropizadas.

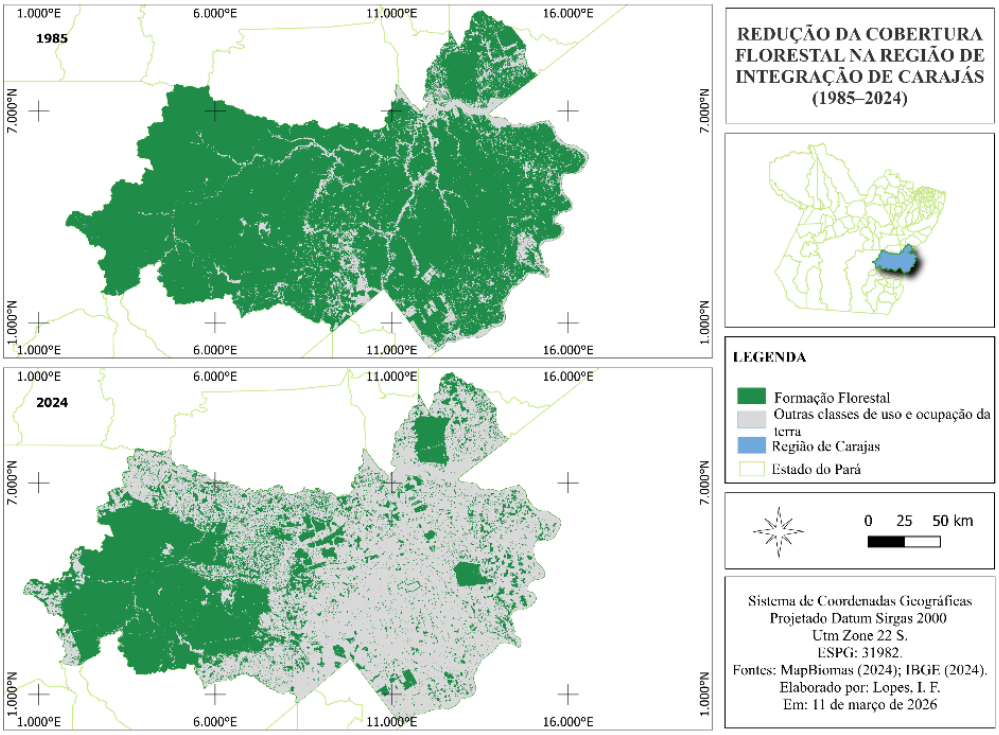


Figura 3 – Redução da cobertura florestal na Região de Integração de Carajás (1985–2024) Fonte dos dados: IBGE 2024 e Mapbiomas Collection 2024.

A Figura 4 apresenta a evolução percentual das principais classes de uso e ocupação da terra na Região de Integração de Carajás entre os anos de 1985 e 2024.

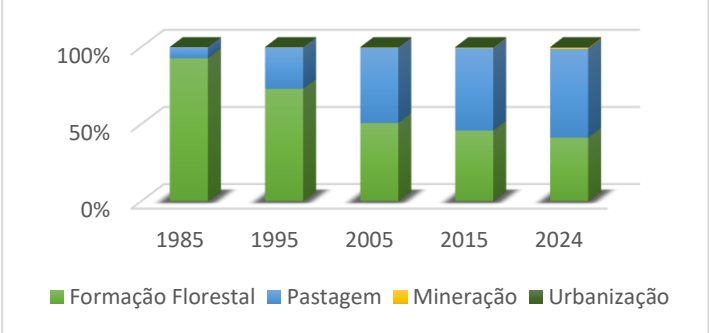


Figura 4 – Evolução percentual das classes de uso e ocupação do solo na Região de Integração de Carajás. Fonte: autoras, 2026.

Atualmente, os sistemas de produção convencional geram diversos problemas, como a retirada da vegetação natural para a abertura de novas áreas agrícola, causando impactos no habitat de diferentes espécies animais, além da degradação do solo em função de longos períodos de exposição (Rosset, *et al*., 2014).

A conversão de áreas de vegetação natural em usos agropecuários pode resultar em diversos impactos ambientais, especialmente relacionados ao solo. Estudos como o de Gomes (2019) afirma que o avanço do agronegócio, especialmente da agricultura e da pecuária, tem provocado diversos impactos ambientais, afetando o solo, a água e o ar, além de comprometer a biodiversidade, a disponibilidade hídrica e a saúde humana, evidenciando a necessidade da adoção de sistemas mais sustentáveis, para as atividades antrópicas na Região de Carajás.

Considerando que as áreas de pastagem passaram de 7,07% em 1985 para 57,63% em 2024 na Região, é fundamental discutir estratégias produtivas que possibilitem a intensificação sustentável do uso da terra. Sendo assim, com a expansão expressiva das áreas de pastagem observada na Região de Integração de Carajás, sistemas integrados de produção, como a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e os Sistemas agroflorestais (SAFs) são alternativas sustentáveis para a agropecuária para que não haja a necessidade de abertura de novas áreas.

Para Paludo e Costabeber (2012), os SAFs correspondem a forma de uso da terra que combinam espécies arbóreas com cultivos agrícolas e até mesmo animais em uma mesma área, organizadas ao longo do tempo. Camargo *et al.* (2023) caracterizam o sistema agroflorestal como um sistema que integra diferentes tipos de culturas, como grãos, arvores, leguminosas, além da criação de animais, de modo que a floresta atua como elemento integrador do sistema.

Já a ILPF é uma estratégia de produção que integra atividades agrícolas, pecuárias e florestais em uma mesma área, podendo ser combinada com dois ou três componentes, seja de forma consorciada, rotacionada ou em sucessão, desde que haja interação entre eles (EMBRAPA, 2019). A ILPF busca transformar o uso da terra por meio da integração dos componentes produtivos, com o objetivo de alcançar melhores níveis de qualidade produtiva, ambiental e competitiva. (Balbino *et al*., 2012).

Esses tipo de sistema se destaca se comparado à agricultura convencional. Os resultados indicam uma transição da matriz florestal para uma matriz predominantemente agropecuária na Região de Integração de Carajás nas últimas quatro décadas. A análise indicou intensificação do desflorestamento a partir de 1995, com destaque para o intervalo entre 2005 e 2024, quando a expansão das áreas de pastagem superou a cobertura florestal na região estudada.

Considerações finais

O presente trabalho apresenta os resultados da análise multitemporal do uso e ocupação da terra na Região de Integração de Carajás. O estudo evidencia expressivas transformações na paisagem nos anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2024, destacando-se a redução das áreas de formação florestal e a expansão das áreas de pastagem, o que consolida a agropecuária como principal forma de uso da terra na região.

Foram elaborados mapas de uso e ocupação do solo (períodos: 1985, 1995, 2005, 2015 e 2024), permitindo a análise das mudanças ao longo do tempo, que refletem a intensificação das ações antrópicas. Os resultados demonstram que esse processo está diretamente relacionado à inserção da região no Arco do Desmatamento da Amazônia Legal, bem como à intensificação das atividades mineradoras, agropecuárias e ao crescimento populacional.

Dessa forma, a pesquisa reforça a importância do uso de ferramentas de geoprocessamento associadas à análise multitemporal do uso da terra. Os achados da pesquisa evidenciam, ainda, a necessidade de implementação de estratégias para um manejo sustentável do solo na região, por meio de sistemas integrados de produção, como a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e os Sistemas Agroflorestais (SAFs).

Referências Bibliográficas

ANDRADE, Mayara Cunha. **Dinâmica de desflorestamento na região de Carajás**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, 2021.

ASSENNATO, Francesca et al. The impact of urbanization on land: a biophysical-based assessment of ecosystem services loss supported by remote sensed indicators. **Land**, v. 11, n. 2, p. 236, 2022. DOI: 10.3390/land11020236.

AZEVEDO, Tasso et al. **Relatório anual do desmatamento no Brasil 2020**. São Paulo: MapBiomas, 2021. Disponível em: alerta.mapbiomas.org. Acesso em: 23 abri. 2026.

BALBINO, Luiz Carlos et al. Contribuições dos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) para uma agricultura de baixa emissão de carbono. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 6, n. 1, p. 8–26, 2011.

EMBRAPA. Integração lavoura-pecuária-floresta: noções técnicas. Brasília, DF: Embrapa, 2019. Disponível em: https://www.embrapa.br/tema-integracao-lavoura-pecuaria-floresta-ilpf/nota-tecnica. Acesso em: 22 abri. 2026.

FERNANDES, Patrícia Capanema Álvares. Natureza, infraestrutura, mineração e urbanização: cartografando interseções históricas na região de Carajás. In: MONTEIRO, Maurílio de Abreu (org.). **Amazônia: a região de Carajás**. Belém: NAEA, 2023. p. 93–114. DOI: https://doi.org/10.4322/978-85-7143-217-8.cap06.

FURTADO, Layse Gomes et al. Detecção de mudanças do uso e cobertura do solo no município de Canaã dos Carajás, Pará. **Revista Verde Grande: Geografia e Interdisciplinaridade**, v. 5, n. 2, p. 116–131, 2023.

GOMES, Cecília Siman. Impactos da expansão do agronegócio brasileiro na conservação dos recursos naturais. **Cadernos do Leste**, Belo Horizonte, v. 19, n. 19, 2019.

PARENTE, Ester Brito; SILVA, Lucas Vinicius Alves da; SILVA, Wanderson Carvalho da. Desmatamento na Amazônia: o desmatamento em vista da expansão pecuarista no município de Xinguara-PA. **Revista GeoAmazônia**, Belém, v. 9, n. 17, p. 126–142, 2021.

RIBEIRO, Julia; BOURSCHEIDT, Vandoir. Uso da terra e tendência de dados climatológicos no arco do desmatamento amazônico. *RA'E GA* – **O Espaço Geográfico em Análise**, v. 59, 2024.

ROSSET, J. S. et al. Agricultura convencional versus sistemas agroecológicos: modelos, impactos, avaliação da qualidade e perspectivas**. Scientia Agraria Paranaensis**, v. 13, n. 2, p. 80–94, 2014.

FUNDAÇÃO AMAZÔNIA DE AMPARO A ESTUDOS E PESQUISAS DO PARÁ (FAPESPA). **População, área territorial e densidade demográfica – Região de Integração Carajás (2021)**. Belém: FAPESPA, 2021. Disponível em: https://www.fapespa.pa.gov.br/sistemas/radar2021/tabelas/4-carajas/tabela-1-populacao-area-territorial-e-densidade-demografica-2021-ri-carajas.htm. Acesso em: 6 abr. 2026.

FUNDAÇÃO AMAZÔNIA DE AMPARO A ESTUDOS E PESQUISAS DO PARÁ (FAPESPA). **Relatório da Região de Integração Carajás 2024**. Belém: FAPESPA, 2024. Disponível em: https://www.fapespa.pa.gov.br. Acesso em: 6 abr. 2026.

MAPBIOMAS. Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. 2024. Disponível em: https://mapbiomas.org. Acesso em: 21 jan. 2026.

SINDICATO DAS INDÚSTRIAS MINERAIS DO ESTADO DO PARÁ (SIMINERAL). **Boletim do setor mineral do Pará**. Belém: SIMINERAL, 2022.

EVOLUÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO MUNICÍPIO DE VANINI-RS: SUBSÍDIOS AO PLANEJAMENTO AMBIENTAL MUNICIPAL

1 Vania Elisabete Schneider, 2 Bianca Breda, 3 Izaias Rodrigues de Souza Neto, 4 Marcela Matos Silva Santos
1 Universidade Federal de Sergipe, e-mail:veschnei@ucs.br; 2 Rennovare Soluções Ambientais, e-mail: bianca.breda@rennovare.eco.br; 3 Universität Siegen, e-mail: izaias.neto@uni-siegen.de; 4 Universidade Federal de Sergipe, e-mail: engenheiramarcela@yahoo.com.br

Palavras-chave: MapBiomas, Impactos na paisagem, Dinâmica territorial

Resumo

Nas últimas décadas, as alterações na utilização e na ocupação do solo têm se intensificado em diferentes regiões do Brasil, impulsionadas principalmente pela expansão da fronteira agropecuária e pelo crescimento urbano. Paralelamente, o avanço das metodologias geotecnológicas, especialmente no campo do sensoriamento remoto e dos sistemas de informação geográfica (SIG), ampliou significativamente a capacidade de observar e analisar transformações espaciais em diferentes escalas e ao longo do tempo. Nesse contexto, o presente estudo objetivou analisar a evolução do uso e da ocupação do solo no município de Vanini (RS), no período de 1985 a 2024, com base em dados do projeto MapBiomas e em técnicas de geoprocessamento. Os resultados evidenciam mudanças expressivas na dinâmica territorial, destacando-se a redução das áreas de vegetação nativa e a expansão das atividades agropecuárias, especialmente da cultura da soja, que passou a predominar no município. Observa-se, ainda, a diminuição das áreas de pastagem e de lavouras tradicionais, o que indica um processo de especialização produtiva associado ao agronegócio. Embora esse cenário esteja relacionado ao crescimento econômico local, também suscita preocupações quanto aos impactos ambientais, como a fragmentação de habitats e os desafios à conservação da biodiversidade. Nesse sentido, reforça-se a importância do monitoramento contínuo do uso do solo como ferramenta estratégica para o planejamento ambiental e a promoção da gestão sustentável em nível municipal.

Introdução

Nas últimas décadas, as alterações na utilização e na ocupação do solo têm se intensificado em diferentes regiões do Brasil, impulsionadas principalmente pela expansão da fronteira agropecuária e pelo crescimento urbano (Kraeski et al., 2023; Cardoso et al., 2021). Essas modificações transformam as interações na paisagem, influenciando os processos ecológicos, hidrológicos e geomorfológicos e, ao mesmo tempo, prejudicando a prestação de serviços ecossistêmicos essenciais ao sustento dos sistemas ambientais (Fushimi et al., 2024; Salmona et al., 2023). Tais alterações são exemplificadas por consequências ambientais distintas, como perda de solo, redução da biodiversidade, impermeabilização do terreno, expansão urbana e alterações na qualidade da água, ressaltando, assim, as inter-relações entre influências antropogênicas e fenômenos naturais (Fushimi et al., 2024; Alvarenga et al., 2021; Duarte et al., 2021; Cardoso et al., 2021). Nesse contexto, o monitoramento das transformações no uso e na cobertura do solo constitui uma ferramenta essencial para subsidiar políticas de planejamento territorial, de conservação ambiental e de gestão sustentável dos recursos naturais.

O avanço das metodologias geotecnológicas, particularmente nos domínios do sensoriamento remoto e dos sistemas de informação geográfica (SIG), aumentou significativamente a capacidade de observar e analisar as transformações na paisagem em múltiplas dimensões espaciais e temporais (Hussain et al., 2022; Potapov et al., 2022). A disponibilidade de sequências históricas de imagens orbitais, aliada a bancos de dados geoespaciais integrados, facilitou a execução de análises multitemporais abrangentes, permitindo o discernimento de padrões de alteração da paisagem, tendências na transformação da cobertura vegetal e mecanismos subjacentes à proliferação de aplicações antropogênicas (da Silva et al., 2022; Muhammad et al., 2022). Iniciativas voltadas ao mapeamento sistemático da utilização e da cobertura do solo, como o projeto MapBiomas (Souza Jr. et al., 2020), estabelecido no Brasil por meio de uma rede colaborativa associada ao Observatório do Clima, desempenharam papel significativo no fornecimento de bancos de dados padronizados e temporalmente comparáveis (Cruz et al., 2024; Silveira et al., 2022).

No contexto do Brasil, as alterações na utilização e na ocupação do solo estão profundamente interconectadas às trajetórias históricas de expansão agrícola, urbanização e reconfiguração de empreendimentos produtivos no território (Rocha et al., 2022; Cardoso et al., 2021; Jessen, 2023). No estado do Rio Grande do Sul, as alterações na utilização e na ocupação do solo estão profundamente ligadas aos processos de expansão e modernização da agricultura, que promoveram transformações consideráveis nas paisagens rurais nas últimas décadas (Ronavi et al., 2020; Rhoden et al., 2022).

O conhecimento aprofundado do espaço geográfico em escala municipal, especialmente no que se refere à dinâmica de uso e ocupação do solo e à conservação dos remanescentes naturais, constitui um instrumento fundamental para o planejamento territorial e a formulação de políticas públicas ambientais. Esse entendimento possibilita não apenas a preservação e conservação dos ecossistemas, mas também a valorização integrada do patrimônio natural e antrópico. Os impactos ambientais decorrentes das atividades humanas manifestam-se de forma multifacetada no território, e a análise desses impactos fornece subsídios técnicos essenciais para a implementação de estratégias de gestão que visem mitigar os efeitos das ações antrópicas e promover o uso sustentável do território (Souza; Sousa, 2023). O planejamento do uso do solo é essencial para evitar conflitos territoriais e garantir

a efetividade das políticas ambientais, sendo necessária a integração com instrumentos como os planos diretores municipais, os planos de saneamento, os planos ambientais e os planos de arborização urbana, entre outros.

Diante desse contexto, este estudo busca examinar a evolução da utilização e da ocupação do solo no município de Vanini (Rio Grande do Sul), por meio de uma metodologia multitemporal baseada em dados geoespaciais. Busca-se identificar padrões de alteração da paisagem ao longo do período analisado, evidenciando as modificações nas categorias predominantes de uso do solo e ponderando suas possíveis ramificações sobre a dinâmica territorial e ambiental do município. Ao aprimorar a compreensão das transformações espaciais em escala local, busca-se fornecer informações fundamentais para o planejamento ambiental e a gestão sustentável dos recursos do município.

Material e Métodos

Área de estudo: O município de Vanini localiza-se na Região do Planalto Meridional do Rio Grande do Sul, na mesorregião Noroeste do estado e na microrregião de Passo Fundo (Figura 1). A sede do município localiza-se na latitude 28º28'42" sul e na longitude 51º50'42" oeste, a uma altitude de 757 metros acima do nível do mar. O território do município localiza-se integralmente no domínio do bioma Mata Atlântica. O Município insere-se no contexto dos recursos hídricos do Estado do Rio Grande do Sul, na bacia do rio Carreiro, afluente do rio Taquari-Antas, cuja bacia, por sua vez, integra o território da bacia do rio Jacuí, sendo este um dos formadores da região hidrográfica do rio Guaíba. A área total do município de Vanini é de 64,905 km² (IBGE, 2022), dos quais 0,96 km² correspondem à zona urbana, o que representa 1,5% da área municipal. Os restantes 98,5% são classificados como áreas rurais. A densidade demográfica do município é de aproximadamente 30,88 hab./km², totalizando 2.004 habitantes (IBGE, 2022).

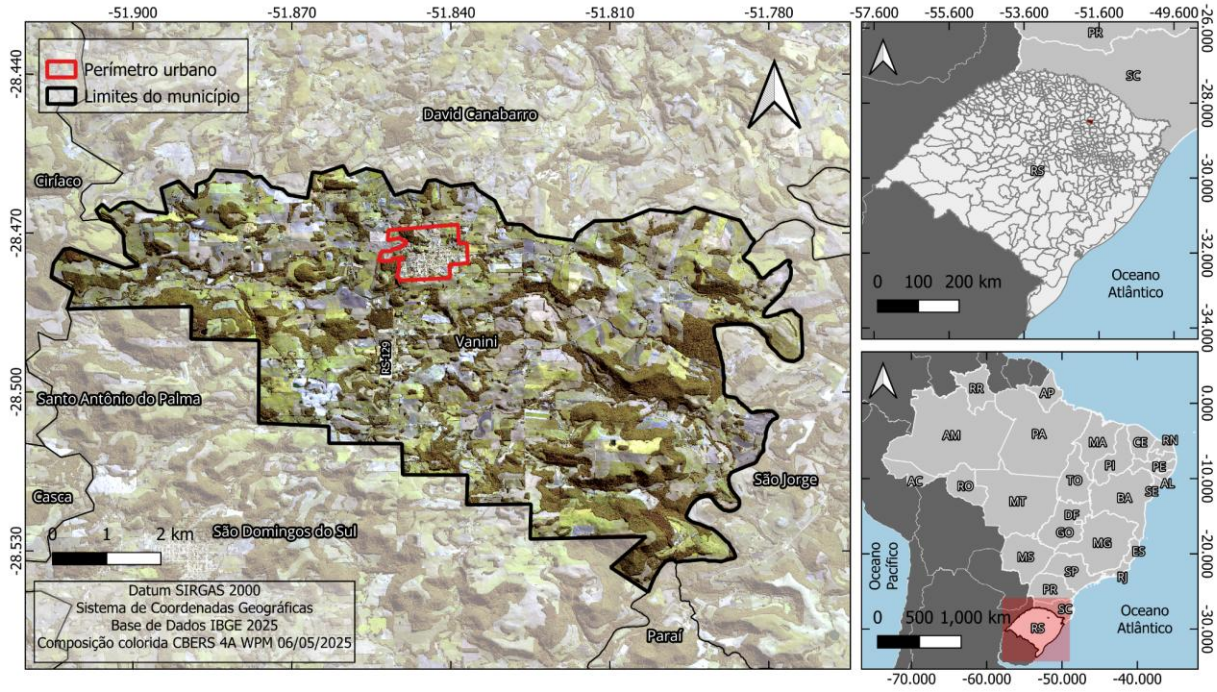


Figura 01: Localização do município de Vanini/RS.
Fonte: Autores, com base em IBGE (2025)

Evolução do Uso e Ocupação do Solo: A análise da evolução do uso e da ocupação do solo no município de Vanini foi realizada a partir de dados do Projeto MapBiomas, iniciativa colaborativa e multi-institucional que monitora as transformações na cobertura e no uso do solo e produz séries históricas anuais de mapas para todo o território brasileiro, com base em imagens da série Landsat. Neste trabalho, utilizaram-se dados da Coleção 10, que disponibiliza mapeamentos anuais com resolução espacial de 30 m para o período 1985–2024, e foram consideradas 9 classes temáticas de uso e cobertura do solo, conforme apresentado na Figura 2 e na Tabela 1. A evolução do uso e da ocupação do solo foi analisada por meio de uma abordagem multitemporal, com a seleção de anos representativos em intervalos de 5 anos, adotados com o objetivo de evidenciar tendências estruturais de transformação da paisagem ao longo do tempo e de reduzir a influência de variações interanuais na classificação da cobertura do solo. Sendo assim, foram considerados os anos de 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 e 2024. Para cada ano analisado, foram calculadas as áreas ocupadas por cada classe de uso e de cobertura do solo, expressas em km². Os dados de uso e cobertura do solo foram processados em um ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software QGIS. Os dados foram recortados para corresponder ao limite territorial do município de Vanini (RS), permitindo extrair informações apenas da área de estudo. Todas as bases cartográficas foram organizadas considerando o sistema de referência SIRGAS 2000. Com base nos dados obtidos, foram elaborados mapas temáticos e tabelas que permitiram analisar a distribuição espacial das classes de uso e ocupação do solo e sua evolução temporal no município de Vanini.

Resultados e Discussão

Na Figura 2 e na Tabela 1, pode-se observar como vem ocorrendo a ocupação do território ao longo dos últimos 30 anos, considerando as formações de floresta, pastagem, mosaico de usos, área urbanizada, áreas não vegetadas, recursos hídricos, plantios de soja, culturas temporárias e silvicultura.

Tabela 01: Evolução do uso e da ocupação do solo no município de Vanini de 1985 a 2024.

Classe	Ano/km²								
	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2024
Outras Áreas não Vegetadas	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,09	0,14	0,18
Rio, lago e oceano	0,07	0,09	0,09	0,07	0,06	0,06	0,08	0,06	0,10
Silvicultura	0,11	1,27	1,89	2,01	2,07	2,49	3,31	3,67	3,65
Área Urbanizada	0,21	0,22	0,27	0,41	0,49	0,58	0,62	0,72	0,90
Soja	0,27	0,45	1,36	10,94	20,16	20,37	26,02	28,22	30,31
Pastagem	8,62	8,03	6,31	4,99	2,27	1,03	0,96	0,85	0,66
Mosaico de Usos	12,12	10,49	11,23	11,99	12,79	8,38	7,47	7,99	9,07
Outras Lavouras Temporárias	20,74	22,49	22,21	12,34	5,85	11,17	6,80	5,67	3,34
Formação Florestal	22,74	21,85	21,54	22,15	21,21	20,78	19,55	17,57	16,70

Fonte: Autores, com base no MapBiomas (2025)

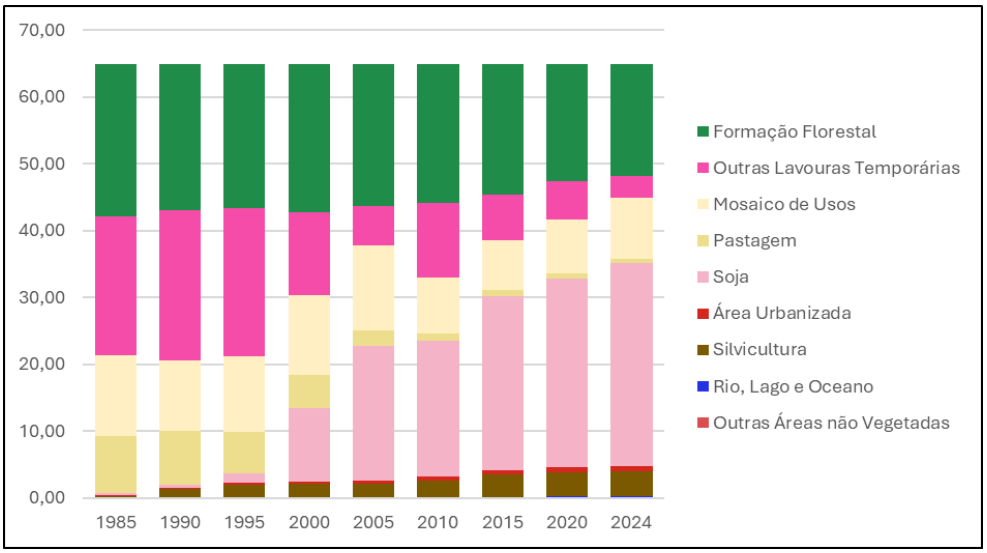


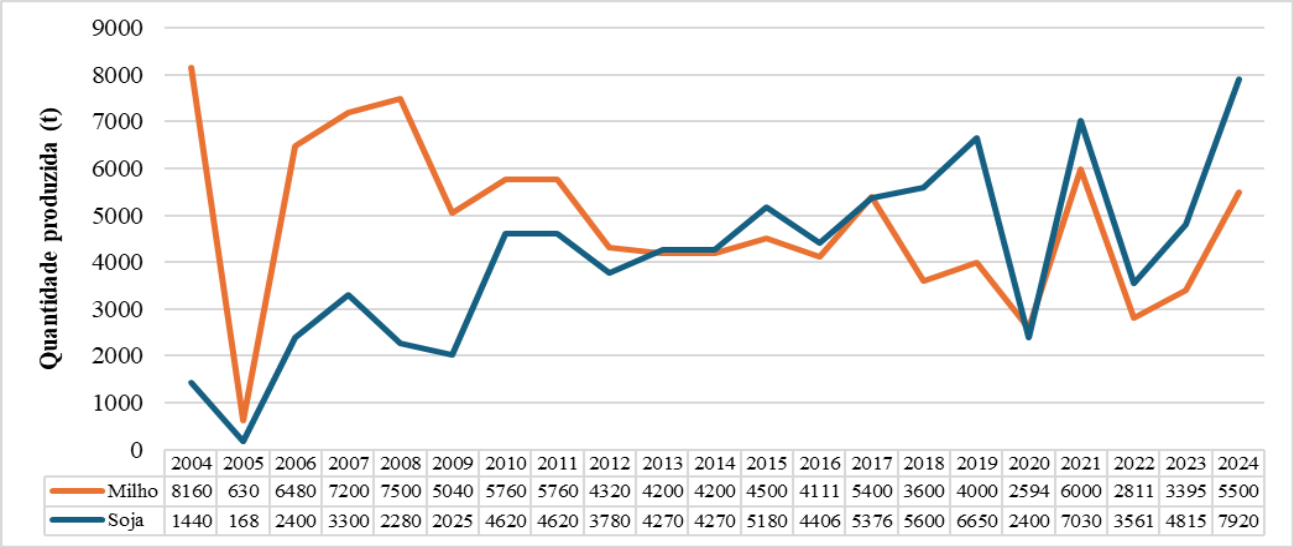
Figura 02: Tendências no uso e na ocupação do solo no município de Vanini/RS nos últimos 30 anos.
Fonte: Autores com base no MapBiomas (2025)

A análise da evolução do uso e ocupação do solo no município de Vanini, no período de 1985 a 2024, evidencia mudanças estruturais significativas na dinâmica territorial, com destaque para a intensificação das atividades agrícolas e a redução de áreas naturais.

Observa-se, inicialmente, uma tendência contínua de diminuição das áreas de formação florestal ao longo das últimas quatro décadas (redução de 6,04 km²). Em 1985, essa classe representava uma das principais coberturas do território, porém vem sendo gradualmente substituída por usos antrópicos, especialmente por atividades agropecuárias. Esse processo indica a conversão de áreas de vegetação nativa em áreas produtivas, refletindo pressões econômicas e expansão da fronteira agrícola.

Paralelamente, verifica-se uma expressiva mudança no perfil das lavouras temporárias. As áreas classificadas como "outras lavouras temporárias" apresentavam participação elevada até a década de 1990, mas sofreram redução acentuada a partir dos anos 2000 (17,40 km²). Em contrapartida, a cultura da soja apresenta crescimento significativo no mesmo período, tornando-se a principal classe de uso do solo em 2024 (com uma expansão de 30,04 km²). Tal movimento evidencia a especialização produtiva do município, alinhada às dinâmicas do agronegócio e à adoção de monoculturas voltadas ao mercado.

Quando se compara à quantidade colhida das culturas produzidas no município, verifica-se que, de fato, a soja apresentou crescimento exponencial nos últimos 20 anos, passando de 1.500 toneladas em 2004 para 8 mil toneladas em 2024, conforme a Figura 3 (IBGE, 2024). Destaca-se que o milho também apresenta produção bastante expressiva em Vanini, porém, com pequeno decréscimo nos últimos anos, com média de 5 mil toneladas por ano.

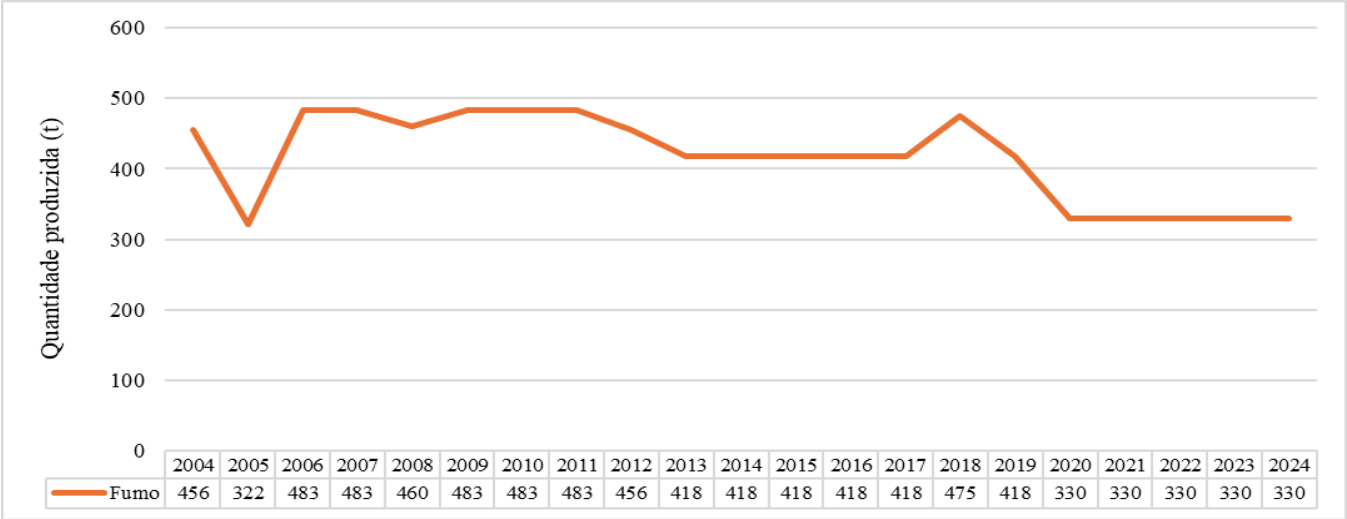


	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milho	8160	630	6480	7200	7500	5040	5760	5760	4320	4200	4200	4500	4111	5400	3600	4000	2594	6000	2811	3395	5500
Soja	1440	168	2400	3300	2280	2025	4620	4620	3780	4270	4270	5180	4406	5376	5600	6650	2400	7030	3561	4815	7920

Figura 03: Evolução da produção das culturas de soja e de milho em Vanini nos últimos 20 anos.
Fonte: IBGE (2024)

As áreas de pastagem demonstram tendência de retração ao longo do período analisado (redução de 7,96 km²), sugerindo uma possível diminuição da pecuária extensiva ou sua substituição por atividades agrícolas mais rentáveis. O mosaico de usos, por sua vez, apresentou leve redução (3,05 km²), mantendo ainda relativa representatividade, o que pode estar associado à permanência de sistemas produtivos diversificados, possivelmente em pequenas propriedades rurais.

Nesse contexto, destaca-se uma característica importante do município de Vanini/RS: a produção de fumo, atividade tradicional e relevante para a economia local. Conforme observado no gráfico, a produção ao longo dos anos apresenta variações, com períodos de maior estabilidade até meados da década de 2010, seguidos por uma tendência de redução mais acentuada a partir de 2019, estabilizando-se com produção aproximada de 330 t/ano, nos anos mais recentes (Figura 4).



	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Fumo	456	322	483	483	460	483	483	483	456	418	418	418	418	418	475	418	330	330	330	330	330

Figura 04: Evolução da produção da cultura de fumo em Vanini nos últimos 20 anos.
Fonte: IBGE (2024)

A silvicultura, por sua vez, registra crescimento expressivo ao longo do período (ampliação de 3,54 km²), ainda que represente uma parcela menor do território, o que pode estar relacionado à expansão de plantios florestais comerciais. Já as áreas urbanizadas apresentam aumento gradual (de 0,69 km²), porém permanecem com baixa representatividade espacial, o que indica que o município mantém características predominantemente rurais.

Por fim, as classes relacionadas a corpos hídricos e outras áreas não vegetadas mantêm-se relativamente estáveis, com pequenas variações ao longo do período (ampliação de 0,03 km² para rios e lagos e de 0,16 km² para outras áreas não vegetadas), sem alterações expressivas na configuração territorial.

Na Figura 5 apresentam-se, espacialmente, as transformações da paisagem ao longo dos últimos 30 anos. Em síntese, o município de Vanini passou por um processo de transição de uma paisagem originalmente mais heterogênea, composta por florestas, pastagens e diversidade de culturas agrícolas, para um padrão mais homogêneo, marcado pela predominância da agricultura mecanizada, especialmente da soja.

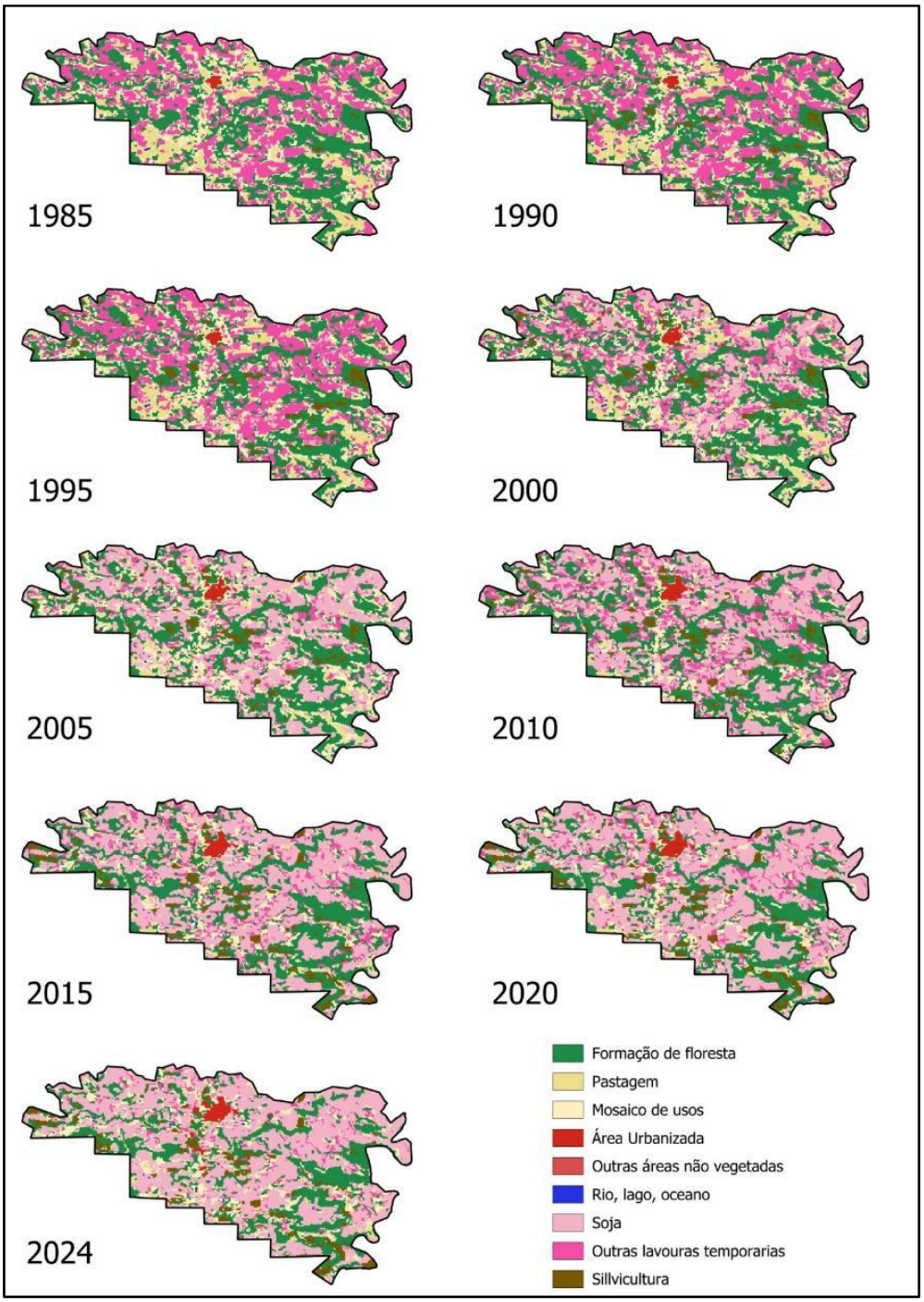


Figura 05: Evolução do uso e da ocupação do solo no município de Vanini de 1985 a 2024.
Fonte: MapBiomas (2025)

Uso e ocupação do solo atual com base no MapBiomas 2024:

A Figura 6 apresenta o uso e a ocupação do solo em 2024 (última versão disponível no MapBiomas), evidenciando a predominância de áreas destinadas ao cultivo de soja, bem como a redução relativa das áreas de vegetação nativa no território municipal.

Observa-se que os remanescentes florestais concentram-se, majoritariamente, ao longo das margens dos cursos d'água, configurando as Áreas de Preservação Permanente (APPs), além de estarem possivelmente associados às áreas de Reserva Legal nas propriedades rurais, as quais correspondem à manutenção obrigatória de, no mínimo, 20% de cobertura de vegetação nativa por lote, conforme estabelecido pelo Código Florestal Brasileiro.

As áreas urbanizadas, representadas em vermelho, apresentam distribuição bastante restrita, concentrando-se essencialmente no núcleo urbano central e no distrito industrial. Essa expressão espacial limitada reforça o caráter predominantemente agropecuário do município de Vanini/RS, no qual as atividades agrícolas desempenham papel central na dinâmica de uso e ocupação do solo.

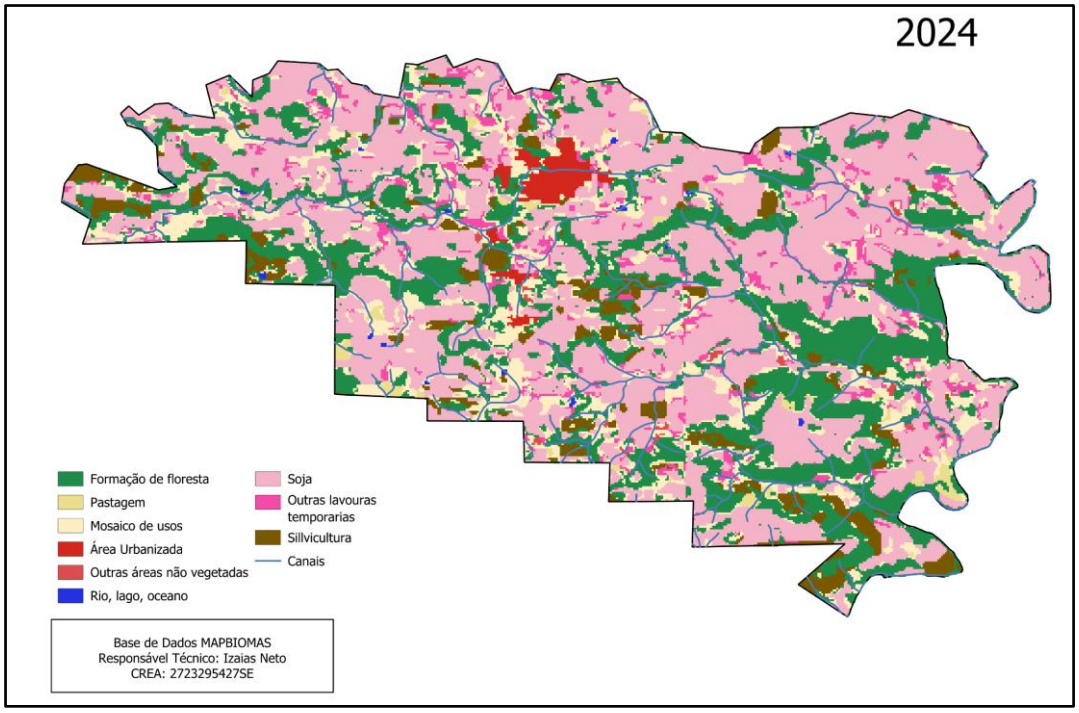


Figura 06: Uso e ocupação do solo no município de Vanini em 2024.
Fonte: MapBiomas (2025)

O padrão espacial observado indica uma organização territorial fortemente vinculada à produção agrícola mecanizada, com fragmentação das áreas naturais e concentração da vegetação remanescente em áreas legalmente protegidas, o que pode implicar na degradação da conectividade ecológica e na conservação da biodiversidade local.

Considerações Finais

O estudo desenvolvido para o município de Vanini, no Rio Grande do Sul, evidenciou mudanças estruturais significativas na dinâmica territorial entre 1985 e 2024. As áreas de formação florestal, que constituíam uma das principais coberturas do território, foram gradualmente substituídas por usos antrópicos, especialmente por atividades agropecuárias. Por outro lado, o perfil das lavouras temporárias, marcado por elevada participação no uso do solo até a década de 1990, vem sendo substituído pela cultura da soja, que, por sua vez, tem se tornado a principal classe de uso do solo no município e tem revelado tendências na base da economia local.

Apesar do avanço da cultura da soja não estar afetando as formações florestais no período analisado com a mesma intensidade que em outras regiões do Brasil, sua participação acelerada no percentual de cobertura do município tem substituído as lavouras tradicionais da região e até mesmo as áreas de pastagem, com impacto positivo na economia local. Tendências de longo prazo não são apenas indicadores da evolução da ocupação territorial, mas também de impactos decorrentes dessas transições, como a perda da biodiversidade, da qualidade das águas e do solo, e da qualidade de vida da população de forma geral. Alerta-se, ainda, para os impactos que a monocultura extensiva pode representar para os pequenos e médios produtores de culturas agrícolas tradicionais.

Ressalta-se, portanto, a importância do conhecimento aprofundado do espaço geográfico e da dinâmica de uso e ocupação do solo como instrumento fundamental para o planejamento territorial e a formulação de políticas públicas socioambientais. O conhecimento do espaço geográfico e de sua dinâmica pode fornecer subsídios para a implementação de estratégias de gestão que visem mitigar os efeitos das ações antrópicas e promover o uso sustentável do território.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Município de Vanini, à CAPES e ao Instituto de Pesquisas sobre Desastres da Universidade Federal de Sergipe pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ALVARENGA, L. R. P.; POMPEU, P. S.; LEAL, C. G.; HUGHES, R. M.; FAGUNDES, D. C.; LEITÃO, R. P. Land-use changes affect the functional structure of stream fish assemblages in the Brazilian Savanna. **Neotropical Ichthyology**, Maringá, v. 19, n. 3, ed. 210035, 2021. DOI: 10.1590/1982-0224-2021-0035.

CARDOSO, M. C.; ALVES, H. da S.; COSTA, I. C. N. P.; VIEIRA, T. A. Anthropogenic Actions and Socioenvironmental Changes in Lake of Juá, Brazilian Amazonia. **Sustainability**, v. *13*(16), n. 9134, 2021. DOI: 10.3390/SU13169134.

CRUZ, J. C. G. da; JARDIM, A. M. de. R. F.; SILVA, A. S. da; SILVA, M. V. da; SILVA, J. L. B. da; MARQUES, R. F. J.; ALBA, E.; NASCIMENTO, A. H. C. do; SILVA, A. F.; SILVA, E. F. da; et al. Spatial–Temporal Dynamics of Land Use and Cover in Mata da Pimenteira State Park Based on MapBiomas Brasil Data: Perspectives and Social Impacts. **AgriEngineering**, v. 6, p. 3327–3344, 2024. DOI: 10.3390/agriengineering6030190.

SILVA, J.L.B. da; REFATI, D.C.; CUNHA, R. C. L. da; CARVALHO, A.A. de; FERREIRA, M. B.; PANDORFI, H.; SILVA, M.V. da. Techniques of Geoprocessing via Cloud in Google Earth Engine Applied to Vegetation Cover and Land Use and Occupation in the Brazilian Semiarid Region. **Geographies**, v. 2, p. 593–608, 2022. DOI: 10.3390/geographies2040036.

CARVALHO, A.M. de; JESUS, D. R. de; SOUSA, T. R. de; RAMOS, M. L. G.; FIGUEIREDO, C.C. de; OLIVEIRA, A. D. de; MARCHÃO, R.L.; RIBEIRO, F. P.; DANTAS, R. de A.; BORGES, L. de A. B. Soil Carbon Stocks and Greenhouse Gas Mitigation of Agriculture in the Brazilian Cerrado—A Review. **Plants**, v. 12, n. 2449, 2023. DOI: 10.3390/plants12132449.

DUARTE, M. N.,; PEREIRA,. M.; LIMA, P. de F.; PEREIRA, E. C. B.; LOPES, F. B.; REZENDE, C. F. Limnological dynamics in an artificial reservoir and intermittent river in the semi-arid region as a function of land use and occupation. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 51, n. 1, e20207181, 2021. DOI: 10.5935/1806-6690.20210010.

FUSHIMI, M.; LIMA, G. N. de; CAPOANE, V. Changes in Land Use and Cover and Their Environmental Impacts in the Cerrado of Mato Grosso Do Sul, Brazil. **Sustainability**, v. 16, n. 4266, 2024. DOI: 10.3390/su16104266.

HUSSAIN, S.; LU, L.; MUBEEN, M.; NASIM, W.; KARUPPANNAN, S.; FAHAD, S.; TARIQ, A.; MOUSA, B.G.; MUMTAZ, F.; ASLAM, M. Spatiotemporal Variation in Land Use Land Cover in the Response to Local Climate Change Using Multispectral Remote Sensing Data. **Land**, v. 11, n. 595, 2022. DOI: 10.3390/land11050595.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Vanini (RS): pesquisa – indicador 10388 (gráfico). Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em: 23 mar. 2026.

JESSEN, I. Land Use Changes in the Teles Pires River Basin's Amazon and Cerrado Biomes, Brazil, 1986–2020. **Sustainability**, v. *15*(5), n. 4611, 2023. DOI: 10.3390/su15054611.

KRAESKI, A.; ALMEIDA, F. T. de; SOUZA, A. P. de; CARVALHO, T. M. de; ABREU, D. C. de; HOSHIDE, A. K.; ZOLIN, C. A. Land Use Changes in the Teles Pires River Basin's Amazon and Cerrado Biomes, Brazil, 1986–2020. **Sustainability**, v. 15, n. 4611, 2023. DOI: 10.3390/su15054611.

MUHAMMAD, R.; ZHANG, W.; ABBAS, Z.; GUO, F.; GWIAZDZINSKI, L. Spatiotemporal Change Analysis and Prediction of Future Land Use and Land Cover Changes Using QGIS MOLUSCE Plugin and Remote Sensing Big Data: A Case Study of Linyi, China. **Land**, v, 11, n. 419, 2022. DOI: 10.3390/land11030419.

RIGHI, E.; CUNHA, C. S.; COSTA, F. da S.; ANDRADES FILHO, C. de O. Dynamics of land use and vegetable cover in the Campos de Cima da Serra region, RS, Brazil, with the use of Google Earth Engine. **International Journal of Agronomy**, [S. l.], v. 2025, 2025. DOI: 10.1155/ioa/5140169.

RHODEN, A., VIANA, J. A.; SILVEIRA, V. C P. (2022). Mudança no uso do solo e dinâmica econômica da Área de Proteção Ambiental do Rio Ibirapuitã, bioma Pampa brasileiro. **Seminário: Ciências Agrárias** . DOI: 10.5433/1679-0359.2022v43n5p2137.

ROCHA, C. de B.; MAJO, C. de; SILVA, S. D. e. A geo-historical analysis of expanding soybean frontiers in the Brazilian Cerrado. **HALAC – Historia Ambiental, Latinoamericana y Caribeña**, v. 12, n. 2, p. 217–252, 2022. DOI: 10.32991/2237-2717.2022v12i2.p217-252.

ROVANI, I. L.; DECIAN, V. S.; ZANIN, E. M.; BRANDALISE, M.; QUADROS, F. R.; HEPP, L. U. Mudanças Socioeconômicas e Uso e Cobertura do Solo da Região Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. **Floresta e Ambiente**, v. 27, 2020. DOI: 10.1590/2179-8087.025818.

SALMONA, Y. B.; MATRICARD, E. A. T.; SKOLE, D. L.; SILVA, J. F. A.; FILHO, O. de A. C.; PEDLOWSKI, M. A.; SAMPAIO, J. M.; CASTRILLÓN, L. C. R.; BANDÃO, R. A.; SILVA, A. L. de; et al. A Worrying Future for River Flows in the Brazilian Cerrado Provoked by Land Use and Climate Changes. **Sustainability**, v. 15, n. 4251, 2023. DOI: 10.3390/su15054251.

SILVEIRA, J. G. da; NETO, S. N. de O.; CANTO, A. C. B. d.; LEITE, F. F. G. D.; CORDEIRO, F. R.; ASSAD, L. T.; SILVA, G. C. C.; MARQUES, R. de O.; DALARME, M. S. L.; FERREIRA, I. G. M.; et al. Land Use, Land Cover Change, and Sustainable Intensification of Agriculture and Livestock in the Amazon and the Atlantic Forest in Brazil. **Sustainability**, v. 14, n. 2563, 2022. DOI: 10.3390/su14052563.

SOUZA, A. C. N. de; SOUSA, M. L. M. de. O papel do planejamento ambiental no ordenamento territorial: bacia hidrográfica como unidade espacial no limiar dessa relação. **Revista de Geografia**, Recife, v. 40, n. 1, p. 383–399, 2023. DOI: 10.51359/2238-6211.2023.254960.

SOUZA JR., C. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; ROSA, M. R.; et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. DOI: 10.3390/rs12172735.

POTAPOV, P.; HANSEN, M. C.; PICKENS, A.; HERNANDEZ-SERNA, A.; TYUKAVINA, A.; TURUBANOVA, S.; ZALLES, V.; LI, X.; KHAN, A.; STOLLE, F.; HARRIS, N.; SONG, X-P.; BAGGETT, A.; KOMMAREDDY, I.; KOMMAREDDY, A. The Global 2000-2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived From the Landsat Archive: First Results. **Frontiers in Remote Sensing**, v. 3, n. 856903, 2022. DOI: 10.3389/frsen.2022.856903.

ESTUDO ESPAÇO-TEMPORAL DO SALDO DE TEMPERATURA EM ÁREAS URBANAS: UMA ABORDAGEM INTEGRADA DERIVADA DO BALANÇO DE ENERGIA

1 Julia De Carvalho Brito, 2 Gabriela Luchetti dos Santos Vieira, 3 Micléia Nascimento Vieira, 4 Roberto Wagner Lourenço

1 Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de Sorocaba, e-mail:julia.c.brito@unesp.br; 2 Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de Sorocaba, e-mail: gabriela.luchetti@unesp.br; 3 Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de Sorocaba, e-mail:micleia.vieira@unesp.br; 4 Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de Sorocaba, e-mail: roberto.lourenco@unesp.br

Palavras-chave: Clima urbano; Saldo de radiação; sustentabilidade.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo investigar a troca calor em áreas urbanas ao longo do tempo e do espaço, utilizando a integração de variáveis ambientais derivadas do algoritmo de Balanço de Energia à Superfície para a Terra, por meio de cálculos computacionais utilizando técnicas de sensoriamento remoto para medir o saldo de radiação e o balanço de energia à superfície. Esta etapa diz respeito aos resultados preliminares da pesquisa de mestrado no campo da climatologia, relacionada a formação de "ilhas de calor urbana (ICU)" decorrentes de desenvolvimento sociodemográfico da cidade Sorocaba, São Paulo, Brasil. Para o desenvolvimento desta etapa, foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 8 e 9, para obtenção do indicador de temperatura de superfície, do Índice de Vegetação Por Diferença Normalizada e do Índice de Diferença Normalizada de Áreas Construídas. Os índices foram normalizados e integrados por meio de média ponderada, resultando em um indicador sintético da intensidade das de troca de calor na área de estudo. Os resultados mostram preliminarmente que a integração entre os índices pode mapear áreas onde o calor apresentou significativas alterações em função da expansão da malha urbana, à redução da cobertura vegetal e ao aumento das temperaturas de superfície, durante o período analisado. Inicialmente, a série temporal mostra que os valores de calor se concentraram na área central, e ao passar ao longo do período de estudo, as áreas de maior aquecimento passaram a se expandir para setores periféricos, especialmente nas direções oeste e noroeste. O trabalho, demonstra que a análise do balanço de radiação e saldo de energia sobre a superfície terrestre, é capaz de controlar a capacidade térmica da superfície urbana, visto que os materiais como asfalto e concreto concentram mais calor e retém radiação, aumentando a temperatura local em comparação com áreas rurais próximas, onde predomina a ocorrência de áreas verdes.

Introdução

A intensificação das transformações ambientais decorrentes do processo de urbanização tem promovido alterações significativas no balanço energético da superfície terrestre, resultando na ocorrência de microclimas urbanos diferenciados. Nesse contexto, a troca de calor entre a superfície e a atmosfera são determinantes para a formação de Ilhas de Calor Urbanas (ICUs). O Balanço de Energia à Superficie Terrestre, é caracterizado pelo saldo de radiação que chega do Sol e a energia que o planeta devolve para o espaço. Quando falamos de aumento de temperatura (aquecimento global), esse equilíbrio é alterado de algumas formas específicas, como por exemplo o aumento das temperaturas do ar e da superfície em áreas urbanizadas em relação às zonas rurais adjacentes, como consequência direta da substituição da cobertura vegetal por materiais construtivos, da impermeabilização do solo e da reorganização da morfologia urbana (Oke, 1973; Amorim, 2019; Fialho, 2012). Tais modificações interferem nos fluxos de energia e nas trocas térmicas entre a superfície e a atmosfera, contribuindo para a elevação das temperaturas e para a alteração das condições de conforto térmico nas cidades (Voogt; Oke, 1997).

As cidades, enquanto espaços de intensa interação entre dimensões sociais, econômicas e ambientais, configuram-se como áreas particularmente vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas. Visto que a expansão urbana, ocorre de forma acelerada e frequentemente desordenado pode contribuir para a intensificação de problemas ambientais, como a poluição atmosférica, a degradação dos ecossistemas urbanos e as alterações microclimáticas, agravando eventos extremos como ondas de calor e enchentes (Abdala et al., 2014; Pinheiro; Souza, 2017; Moreno; Ravache, 2021). Nesse cenário, as ICUs emergem como uma das manifestações mais evidentes da degradação ambiental urbana, diretamente relacionadas ao adensamento construtivo, à redução da ventilação e à diminuição dos processos de evapotranspiração, decorrentes da supressão da vegetação (Romero et al., 2019).

Assim, o saldo de temperatura disponível na superfície terrestre é uma das variáveis que mais contribui para a manifestação do fenômeno das ICUs, no qual abrange a camada ao nível das edificações (do inglês *urban canopy layer*), e a camada limite urbana (do inglês *urban boundary layer*), a qual abrange a superfície da troposfera mais próxima do solo. Por assim sendo, tem sido amplamente investigada por meio de técnicas de sensoriamento remoto (Oke, 1978; Amorim, 2019), visto que o avanço das tecnologias de sensoriamento remoto, especialmente com a disponibilidade de sensores termais em plataformas orbitais, como o programa de satélite de observação da Terra Landsat (NASA/USGS), com a oferta de imagens de alta resolução para monitorar mudanças na superfície terrestre, uso do solo, desmatamento e recursos hídricos, tem ampliado significativamente

a capacidade de análise da superfície terrestre em ambientes urbanos, permitindo inclusive derivar informações relacionadas ao balanço de energia, contribuindo com a identificação de padrões espaciais e a avaliação da variabilidade intraurbana do calor, com forte influência na formação das ICUs (Amorim, 2015; Porangaba; Amorim, 2019).

Nesse sentido, esta etapa da pesquisa, apresenta os resultados da integração do indicador de variação do calor na superfície, representado pela Temperatura de Superfície (T_S), do indicador de saúde da vegetação, o Índice de Vegetação Por Diferença Normalizada (do inglês - NDVI - Normalized Difference Vegetation Index) e do indicar de áreas construídas, o Índice de Diferença Normalizada de Áreas Construídas (do inglês NDBI - Normalized Difference Built-up Index), buscando medir as relações que possam influencia no comportamento térmico urbano, evidenciando os impactos das variáveis no aumento das temperaturas (Zha; Gao; Ni, 2003; Rouse et al., 1974).

No contexto do município de Sorocaba, observa-se, nas últimas décadas, um expressivo crescimento populacional e expansão urbana, de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população passou de aproximadamente 495 mil habitantes no ano 2000 para 723.682 no Censo de 2022, os quais são fatores que abarcam as alterações ambientais e intensificam os processos de aquecimento superficial. Logo, esse cenário reforça a necessidade de investigações que articulem variáveis ambientais e climáticas em diferentes escalas espaço-temporais, a fim de compreender a dinâmica das ICUs. Diante disso, este estudo tem como objetivo a análise da formação e evolução das ilhas de calor urbanas em Sorocaba a partir da integração de variáveis ambientais obtidas por sensoriamento remoto, sendo eles o LST, NDBI e NDVI, buscando compreender as relações entre a dinâmica urbana e as variações térmicas.

Material e Métodos

Área de estudo

O município de Sorocaba está localizado no interior do estado de São Paulo, integrando a Região Sudeste do Brasil e constituindo-se como sede da Região Metropolitana de Sorocaba. Inserido no contexto da Macrometrópole Paulista, apresenta posição estratégica no sistema urbano estadual, favorecida pela proximidade com importantes eixos de circulação e com a capital paulista. De acordo com o IBGE (2022), o município possui área territorial de aproximadamente 449,87 km². O clima de Sorocaba é classificado como Cwa segundo a Classificação climática de Köppen, o qual a EMBRAPA descreve como clima subtropical caracterizado por inverno seco, com temperaturas médias inferiores a 18 °C, e verão quente, com temperaturas médias superiores a 22 °C. A cobertura vegetal original insere-se no domínio da Mata Atlântica.

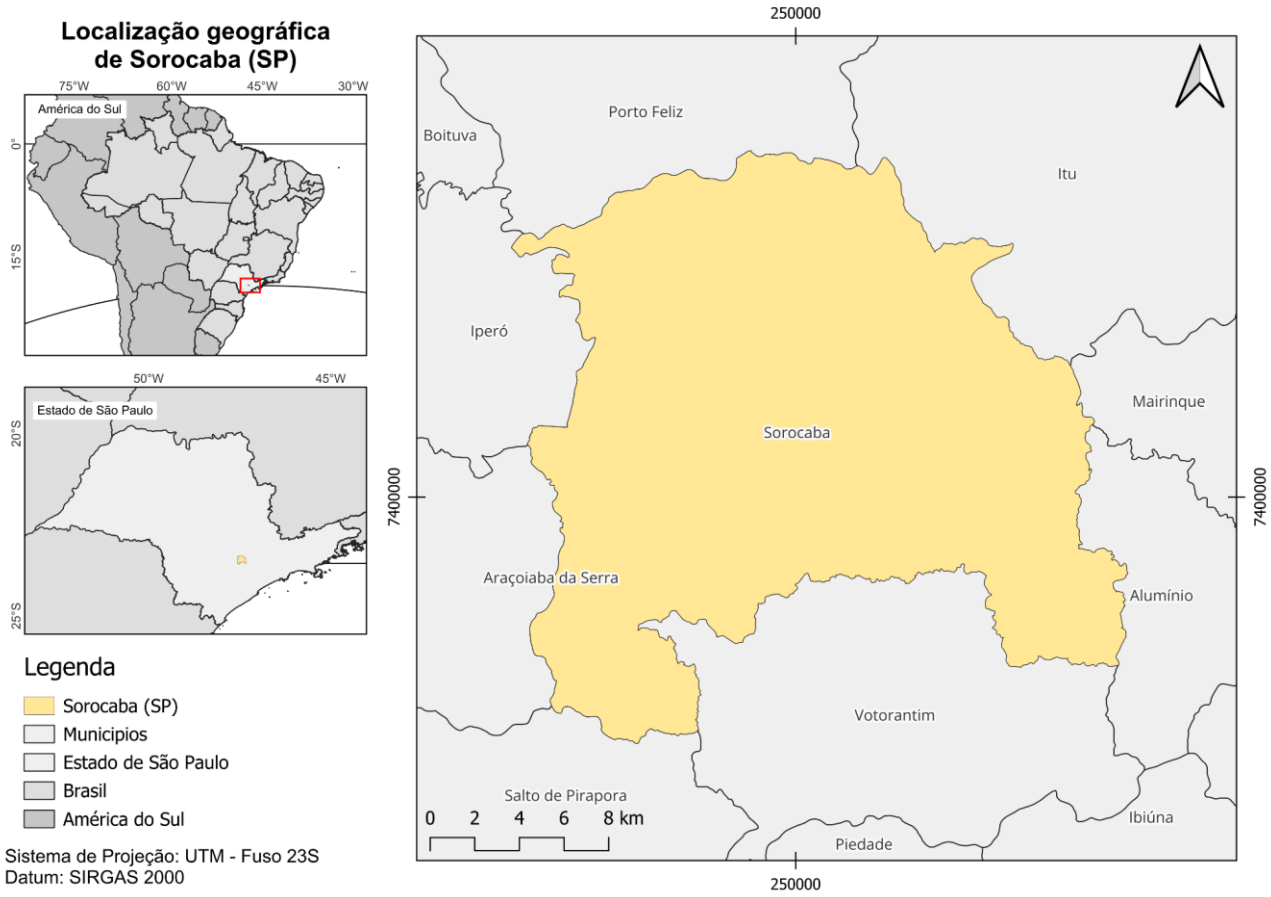


Figura 01: Mapa de localização de Sorocaba (SP)
Fonte: Autoria própria (2026)

A pesquisa se justifica, visto que o município de Sorocaba nas últimas décadas tem experimentado um expressivo crescimento populacional e expansão urbana, onde a população passou de aproximadamente 495 mil habitantes no ano 2000 para 723.682 em 2022 (IBGE, 2022). Logo, esse cenário reforça o interesse por se investigar as condicionantes que tornam o ambiente mais vulnerável às alterações do clima urbano em escalas espaço-temporal, a fim de compreender a dinâmica da formação de eventos que possam contribuir com a formação de ICUs. Diante disso, esta etapa apresenta os resultados preliminares referente a compreender como as variáveis Ts, NDBI e NDVI, podem contribuir com a dinâmica das variações térmicas para a formação de ICUs, no contexto do Balanço de Energia da Superficie Terrestre.

Base de Dados e Plataforma de Processamento

A aquisição e o processamento dos dados geoespaciais foram realizados na plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando imagens dos satélites Landsat 8 (OLI/TIRS) e Landsat 9 (OLI-2/TIRS-2), produto Collection 2 Level 2, que fornece reflectância de superfície (SR) e temperatura de superfície (ST) previamente corrigidas.

Seleção e Filtragem das Imagens

O recorte espacial corresponde as imagens do município de Sorocaba/SP para os anos de 2015, 2020 e 2025, no qual foram aplicados filtros para eliminação de ruídos, sendo eles o Filtro de nebulosidade (cenas com cobertura inferior a 15%) e Máscara de nuvens (uso da banda QA_PIXEL para remoção de nuvens e sombras) para correção atmosféricos, para reduzir ruídos e variabilidade radiometrica, utilizou-se a filtro de mediana na composição das imagens.

Pré-processamento

As imagens do Landsat nível 2 (TIRS 1), foram corrigidas de valores de números digitais para radiância atmosférica pelo algoritmo LaSRC para bandas ópticas do visível e infravermelho próximo. A banda 10 do infravermelho termal (B10) já possui correção integrada no cálculo da temperatura de superfície, considerando as condições atmosféricas e radiométricas. Além disso, as imagens foram reprojetadas para SIRGAS 2000 UTM 23S.

Cálculo dos Índices

Em seguida foram calculados os indicadores:

- Temperatura de Superfície (T_S): representa à energia térmica emitida pela superfície terrestre na forma de radiação infravermelha. Essa radiação é captada por sensores orbitais e convertida em valores de temperatura adimensional.

$$TS = ((DN \times 0.00341802 + 149.0) - 273.15$$

- NDVI: representa as medidas da quantidade de luz solar refletida pelas plantas em diferentes comprimentos de onda (bandas espectrais) do espectro eletromagnético, como o vermelho (R) e o infravermelho próximo (NIR). Apresenta variação entre –1 a 1, e será obtido conforme a equação 1 (Ponzoni e Shimabukuro, 2010).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

- NDBI: representa o teor de umidade na vegetação, utilizando bandas do infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR), variando de -1 a +1.

$$NDBI = \frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR}$$

Padronização dos Dados e Integração dos Índices

Os índices foram padronizados, pelo método de normalização min-max, onde os valores originais foram transformados em uma nova escala de 0 a 1, colocando as variáveis sob uma mesma magnitude, buscando evitar hipervalorização dos valores numéricos muito altos no modelo, além de permitir comparabilidade temporal. Assim, além de escalas de variação compatíveis numericamente, a direção de contribuição também foi ajustada a mesma direção, sendo para maior contribuição ao aquecimento, valores próximos de 1, e para a menor contribuição valores próximos de 0 (zero). Esta particularidade obrigou a inverter a escala do NDVI, onde 1 seria melhor menos importante. Por fim, a integração foi realizada utilizando a álgebra de mapas, com média ponderada baseada na relevância de cada variável, decidida a partir da análise da literatura, sendo: para temperatura (peso 3), para NDBI (peso 2) e NDVI invertido (peso 1), segundo a formal apresentada a seguir:

$$ICU = \frac{(3\ X\ Ts)\ +\ (2\ X\ NDBI)\ +\ (1\ X\ NDVI)}{6}$$

Resultados e Discussão

No que se refere ao NDBI (Figura 03), observa-se um padrão claro de intensificação e expansão das áreas com maiores valores ao longo do período analisado. Em 2015, os maiores índices concentram-se predominantemente na porção centro-sul do município, configurando o núcleo urbano consolidado. Em 2020, verifica-se a expansão dessas áreas em direção aos setores oeste e noroeste, além do adensamento das zonas já urbanizadas. Em 2025, esse processo se acentua, com maior continuidade espacial das superfícies construídas e avanço sobre áreas anteriormente caracterizadas por usos menos intensivos. Tal comportamento indica não apenas a expansão horizontal do tecido urbano, mas também sua densificação interna, com substituição progressiva de superfícies permeáveis por materiais impermeáveis, conforme discutido por Zha, Gao e Ni (2003).

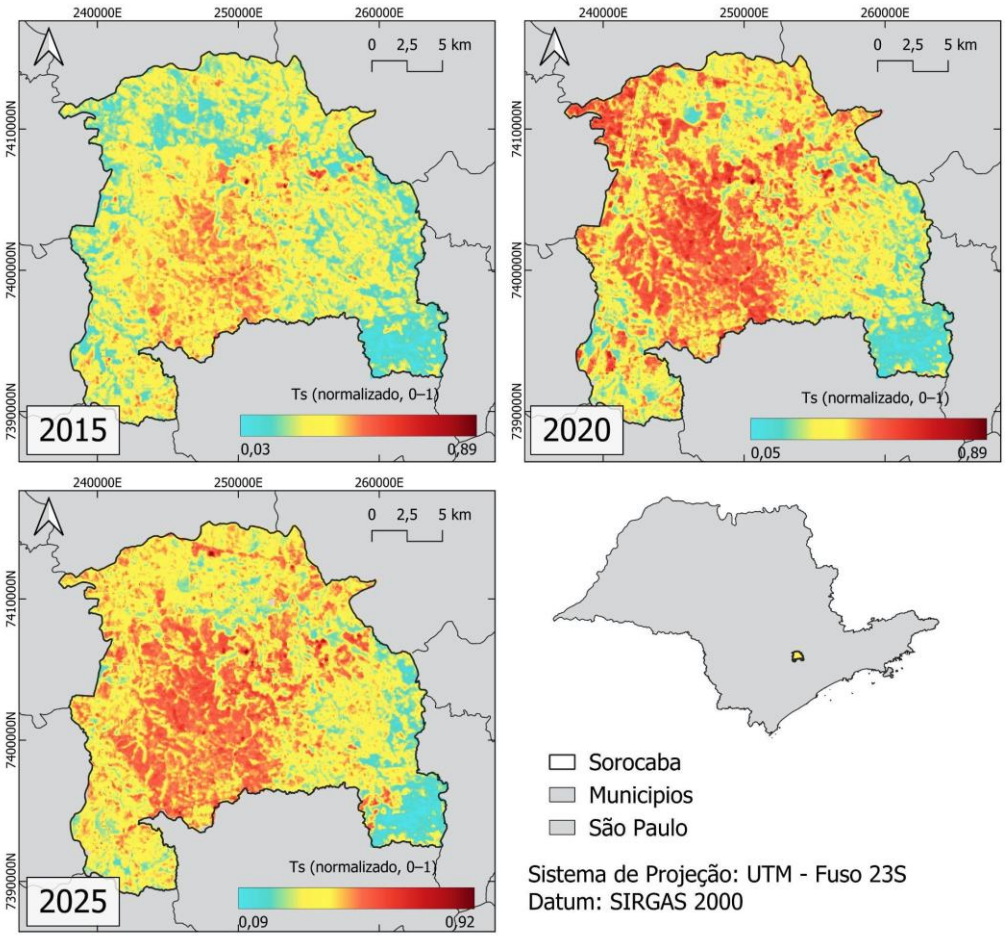


Figura 02: Mapa Cronológico de Temperatura de Superfície de Sorocaba (SP)
Fonte: Autoria própria (2026)

Como pode ser observado na Figura 2, para o ano de 2015, as maiores temperaturas se concentram na área central e em setores adjacentes ao sul, evidenciando, setores com forte influência da urbanização consolidada. Em 2020, há uma expansão das temperaturas mais elevadas em direção ao oeste e noroeste, acompanhando o avanço das áreas construídas, da mesma forma que identificado em NDBI, além do fortalecimento de núcleos secundários de aquecimento. Em 2025, observa-se a intensificação do aumento de calor, com formação de uma extensa mancha contínua de altas temperaturas que abrange grande parte da região central e se estende para setores periféricos, sobretudo nas direções oeste, sudoeste e noroeste. Os valores máximos atingidos nesse período indicam um agravamento do aquecimento superficial, caracterizando a intensificação das ilhas de calor urbanas, em consonância com os pressupostos teóricos de Oke (1982) e de Voogt e Oke (2003).

A Figuras 03 mostra respectivamente os mapas de NDVI, para o município de Sorocaba, no período de 2015 a 2025, onde pode ser observado os padrões de variação e expansão das áreas construídas.

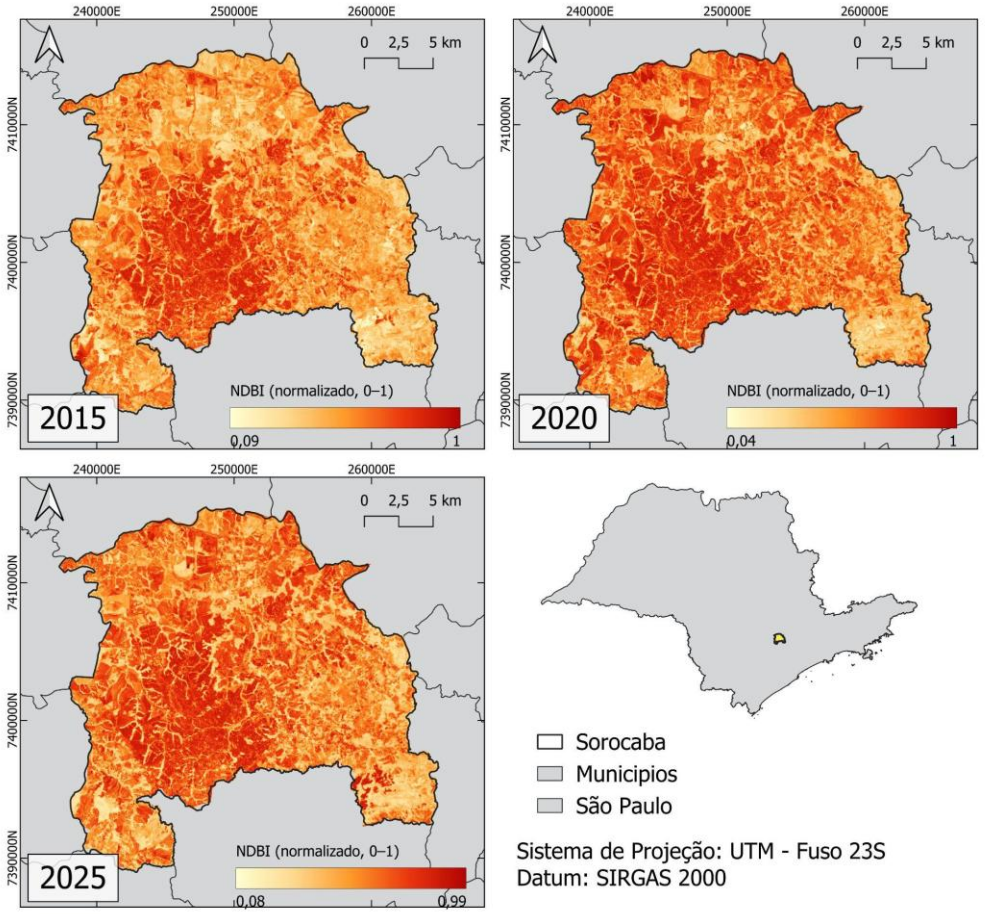


Figura 03: Mapa Cronológico do Índice de Diferença Normalizada da Área Construída de Sorocaba (SP)
Fonte: Autoria própria (2026)

Em 2015, os maiores índices concentram-se predominantemente na porção centro-sul do município, configurando o núcleo urbano consolidado. Em 2020, verifica-se a expansão dessas áreas em direção aos setores oeste e noroeste, além do adensamento das zonas já urbanizadas. Em 2025, esse processo se acentua, com maior continuidade espacial das superfícies construídas e avanço sobre áreas anteriormente caracterizadas por usos menos intensivos. Tal comportamento indica não apenas a expansão horizontal do tecido urbano, mas também sua densificação interna, com substituição progressiva de superfícies permeáveis por materiais impermeáveis, conforme discutido por Zha, Gao e Ni (2003).

Com relação aos mapas de NDVI, apresentado na Figura 04, para o município de Sorocaba, no período de 2015 a 2025, pode-se observar as tendencias da cobertura vegetal ao longo do período estudado. revela uma tendência de redução e fragmentação da cobertura vegetal. Em 2015, os maiores valores concentram-se nas porções periféricas, especialmente ao norte e nordeste, além de manchas distribuídas em áreas menos urbanizadas. Em 2020, observa-se a diminuição desses valores, com fragmentação mais acentuada da vegetação, particularmente nas áreas de transição urbano-rural. Em 2025, essa tendência se intensifica, com redução significativa da continuidade das áreas vegetadas e avanço de zonas com baixos valores de NDVI em direção às áreas anteriormente mais preservadas. Esse processo evidencia a substituição progressiva da vegetação por superfícies construídas, reduzindo a capacidade de regulação térmica do ambiente urbano, conforme apontado por Rouse et al. (1974).

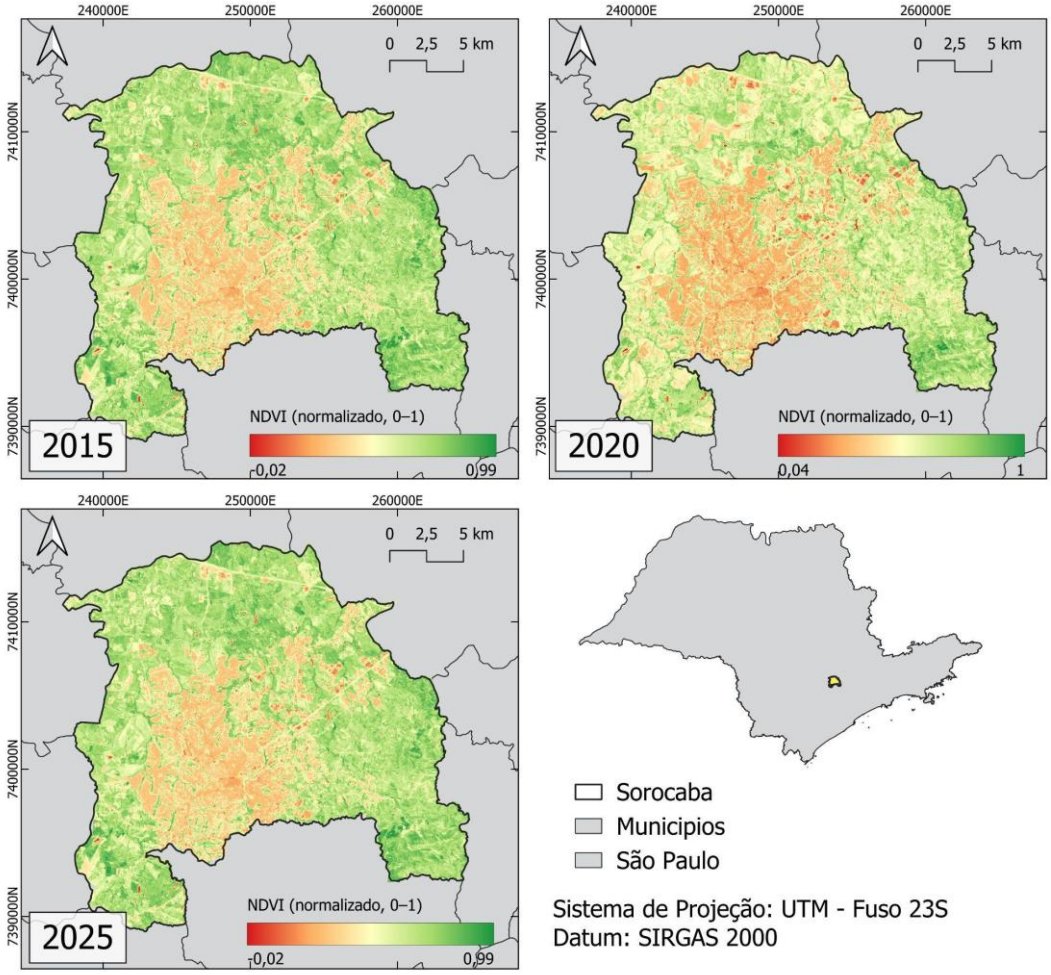


Figura 04: Mapa Cronológico do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada de Sorocaba (SP)
Fonte: Autoria própria (2026)

Em 2015, mostra tendências em que os maiores valores se concentram nas áreas periféricas, especialmente ao norte e nordeste, além de manchas distribuídas em áreas menos urbanizadas. Em 2020, observa-se a diminuição desses valores, com fragmentação mais acentuada da vegetação, particularmente nas áreas de transição urbano-rural. Em 2025, essa tendência se intensifica, com redução significativa da continuidade das áreas vegetadas e avanço de zonas com baixos valores de NDVI em direção às áreas anteriormente mais preservadas. Esse processo evidencia a substituição progressiva da vegetação por superfícies construídas, reduzindo a capacidade de regulação térmica do ambiente urbano, conforme apontado por Rouse et al. (1974).

A síntese da dinâmica relativa que expressa a integração entre os indicadores, mostra que em 2015, as áreas de maior contribuição para concentração de calor estavam na área central, ainda que de forma relativamente descontínua, com manchas isoladas de maior aquecimento. Em 2020, verifica-se a expansão dessas áreas em direção ao oeste, noroeste e sudoeste, com aumento da conectividade entre os núcleos e formação de zonas contínuas de maior intensidade térmica. Em 2025, observa-se a consolidação desse padrão, com uma ampla área central fortemente aquecida e expansão significativa das zonas de intensidade média e alta para setores periféricos, especialmente nas direções oeste e noroeste, além da intensificação de bolsões térmicos em áreas anteriormente intermediárias.

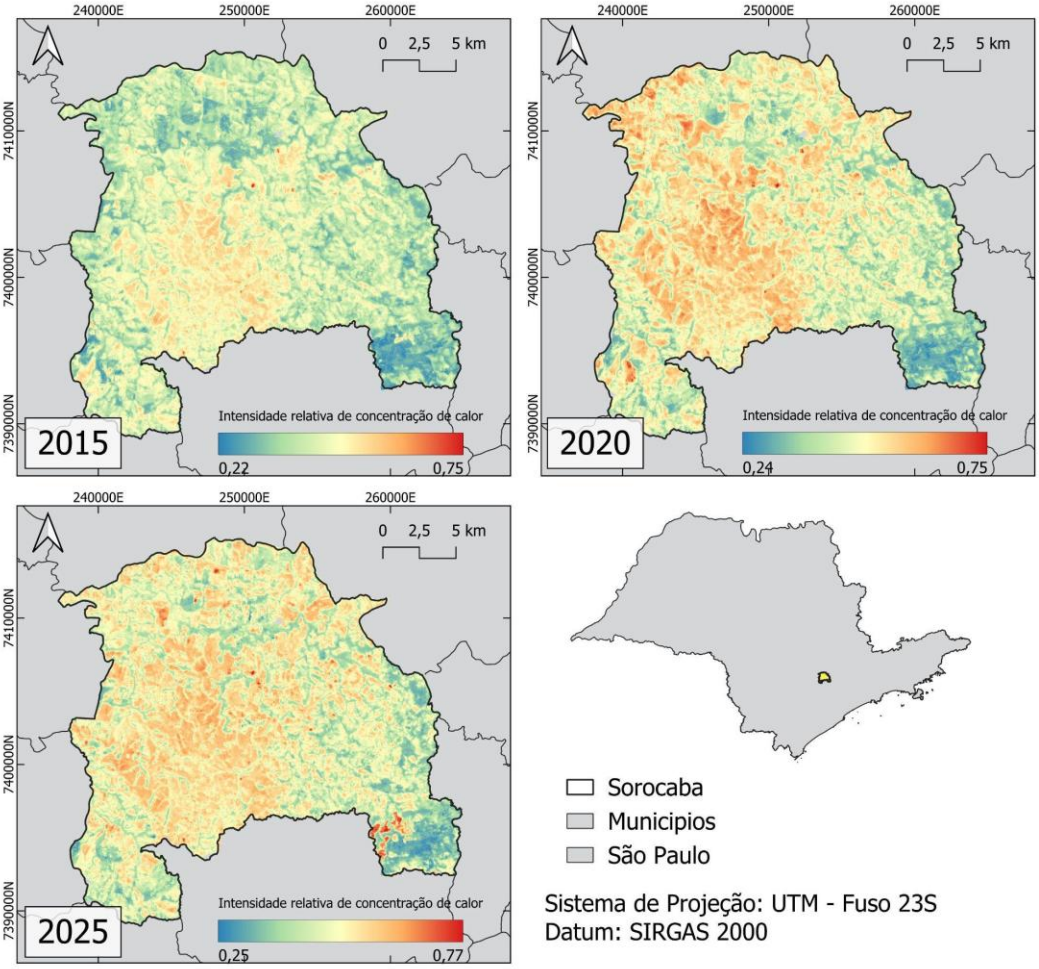


Figura 05: Mapa Cronológico de identificação de concentração de calor de Sorocaba (SP)
Fonte: Autoria própria (2026)

Portanto, ao analisar as variáveis, é possível afirmar preliminarmente uma correlação direta entre o aumento do NDBI e a elevação T_S, com a queda no índice de cobertura vegetal, refletido no NDVI. Desta forma, pode-se considerar inicialmente que áreas identificadas com maior concentração de calor correspondem, de forma consistente, às regiões com maior densidade de áreas construídas, consequentemente com menor presença de vegetação, enquanto as áreas periféricas com maior cobertura vegetal apresentam menor concentração de calor. Ou seja, mais amenas e menor intensidade térmica. Esse padrão confirma como as transformações espaço-temporais antrópicas podem afetar o microclima local, bem como o papel fundamental da vegetação na mitigação do aquecimento urbano, por meio de processos como sombreamento e evapotranspiração (Gartland, 2010).

Considerações Finais

O estudo preliminar, demonstrando a análise integrada dos índices T_S, NDVI e NDBI permitiu compreender a relação entre a dinâmica de urbanização e a intensificação das mudanças de calor no município de Sorocaba. Os resultados demonstram que o avanço das superfícies construídas, aliado à redução da cobertura vegetal, contribui diretamente para o aumento das temperaturas de superfície ao longo do período analisado. Verificou-se que as áreas mais críticas se concentram na região central, com expansão significativa para os setores oeste e noroeste, acompanhando o crescimento urbano.

A aplicação de um índice sintético, baseado na integração ponderada de variáveis ambientais, mostra-se bastante útil em estudos para identificação e espacialização do padrão das variações da intensidade térmica em áreas urbanas. A partir dos resultados preliminares, deve se intensificar os estudos adicionando novas variáveis, especificamente referentes ao balanço de energia da Superfície Terrestre, buscando acrescentar variáveis que exercer influência direta sobre o microclima urbano, visando aprimorar o modelo e obter um diagnóstico com maior acurácia e precisão que fpossa refletir a ocorrência das ICUs da área de estudo, e ajudem a elaborar estratégias de planejamento que priorizem a ampliação e a mitigação dos efeitos do aumento de temperatura, visando à melhoria da qualidade ambiental urbana.

Agradecimento

Os autores agradecem pelo apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e ao Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de Sorocaba pelo apoio técnico e científico.

Referências Bibliográficas

ABDALA, L. N., et al. . Como as cidades inteligentes contribuem para o desenvolvimento de cidades sustentáveis? Uma revisão sistemática de literatura. International Journal of Knowledge Engineering and Management (IJKEM), 3(5), 98–120, 2014

AMORIM, M. C. C. T. Detecção remota de ilhas de calor superficiais: exemplos de cidades de porte médio e pequeno do ambiente tropical, Brasil. Finisterra, v. 52, n. 105, p. 111-133, 2017. DOI: https://doi.org/10.18055/finis6888.

AMORIM, M. C. C. T. Ilhas de calor urbanas: métodos e técnicas de análise. Revista Brasileira de Climatologia, v. 15, Edição Especial, p. 22-41, 2019.

BEZERRA, P. E. S.; MORAES, E. T. I.; SOARES, I. R. C. Análise da temperatura de superfície e do índice de vegetação no município de Belém na identificação das 2ilhas de calor. Revista Brasileira de Cartografia, v. 70, n. 3, p. 803-818, 2018. DOI: https://doi.org/10.14393/rbcv70n3-45701.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Classificação climática de Köppen para o Brasil. Disponível em: https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm. Acesso em: 15 abr. 2026.

FIALHO, E. S. Ilha de calor: reflexões acerca de um conceito. ACTA Geográfica, Boa Vista, ed. esp. Climatologia Geográfica, p. 61-76, 2012.

GARTLAND, L. Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Cidades e estados: Sorocaba (SP). Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/sorocaba.html. Acesso em: 15 abr. 2026.

MORENO, Y. S; RAVACHE, R. L. A vulnerabilidade das cidades com relação às mudanças climáticas. Connectionline, n. 24, 2021.

OKE, T. R. City size and the urban heat island. Atmospheric Environment, v. 7, p. 769–779, 1973.

OKE, T. R. Boundary layer climates. London: Methuen, 1978.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 108, p. 1–24, 1982.

PINHEIRO, C. R.; SOUZA, D. D. (2017). A importância da arborização nas cidades e sua influência no microclima. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, 6(1), 67. https://doi.org/10.19177/rgsa.v6e1201767-82

PORANGABA, G. F. O.; AMORIM, M. C. C. T. Geotecnologias aplicadas à análise de ilhas de calor de superfície em cidades do interior do Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 12, n. 6, p. 2041-2050, 2019.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. *Sensoriamento remoto no estudo da vegetação*. São José dos Campos: INPE, 2010.

ROMERO, M. A. B et al. Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas. 2019.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Washington: NASA, 1974.

VASCONCELLOS, B. N. ARBORIZAÇÃO URBANA: ESSENCIAL PARA A QUALIDADE DE VIDA DA POPULAÇÃO. 2024.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Complete urban surface temperatures. Journal of Applied Meteorology, v. 36, n. 9, p. 1117-1132, 1997.

ZHA, Y.; GAO, J.; 2003.NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. InternationalJournalof Remote Sensing. v. 24, n. 3, p. 583-659.

ANÁLISE DA FRAGILIDADE AMBIENTAL POTENCIAL E EMERGENTE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DO MONJOLINHO, SÃO CARLOS (SP)

Gabriela Pinho de Goes e Jacqueline Zanin Lima
Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP);
e-mail: gabrielagoes@usp.br, jacqueline.zanin.lima@usp.br

Palavras-chave: Lógica Fuzzy; Planejamento Territorial; Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Resumo

A análise de fragilidade ambiental constitui uma ferramenta fundamental para o planejamento territorial, ao integrar as características naturais do meio físico com os efeitos da ocupação humana. Este trabalho aplicou a metodologia de Ross (1994), com adaptações baseadas em lógica Fuzzy, para mapear a fragilidade potencial e emergente da porção do município de São Carlos inserida na bacia hidrográfica do Córrego do Monjolinho (58,65 km²). Utilizando o QGIS 3.34 (Prizren), quatro atributos foram padronizados em escala contínua de pertinência Fuzzy (0,0 a 1,0): declividade, distância de nascentes e drenagens (APP), materiais inconsolidados e uso e ocupação do solo (MapBiomas). Os atributos foram integrados por álgebra de mapas e reclassificados em cinco níveis de fragilidade. A fragilidade potencial revelou predominância da classe baixa (63,53%). Esse resultado reflete o relevo plano a suave ondulado que, pela função sigmoidal adotada, recebeu pertinência Fuzzy próxima a zero, neutralizando outros fatores de risco. Tal tendência é reforçada pela reduzida extensão das APPs (4 km²), únicas áreas com pertinência máxima no critério hidrológico. Mesmo nos domínios do Material Arenoso III, que possui elevada erodibilidade (pertinência 0,9), a fragilidade potencial permanece contida, porque a lógica da média aritmética atenua a influência deste atributo quando associado a declividades baixas, resultando em valores compostos enquadrados na classe baixa, especialmente em áreas afastadas da rede de drenagem. Contudo, a incorporação do uso e ocupação do solo na fragilidade emergente provocou marcante agravamento do quadro, com 47,77% da bacia enquadrada na classe alta e 4,00% na muito alta. Essa variação evidencia o papel decisivo da área urbanizada, que ocupa cerca de 25 km² (42,6% da bacia), na amplificação da vulnerabilidade ambiental. Os resultados demonstram a eficácia da abordagem Fuzzy para representar gradientes contínuos de fragilidade, fornecendo subsídios para o planejamento territorial focado nos vetores de expansão urbana e na recuperação das áreas de preservação permanente.

Introdução

O crescimento urbano acelerado e a intensificação das atividades agropecuárias sobre áreas naturais têm gerado alterações profundas nos sistemas ambientais, comprometendo serviços ecossistêmicos essenciais como a regulação hídrica, a estabilidade dos solos e a manutenção da biodiversidade. Esse cenário evidencia a necessidade de ferramentas robustas para o diagnóstico integrado das condições ambientais do território, capazes de subsidiar decisões de planejamento físico-territorial com base em critérios técnicos e espacialmente explícitos (ROSS, 1994).

O ordenamento das atividades antrópicas fundamentado nas vulnerabilidades da paisagem é um requisito central para o alcance de metas globais, como os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), propostos pelas Nações Unidas. Destacam-se, nesse contexto, as ações relacionadas à gestão hídrica (ODS 6), ao desenvolvimento de cidades resilientes (ODS 11), à mitigação de impactos climáticos (ODS 13), à proteção da vida terrestre (ODS 15) e ao fortalecimento de meios de implementação (ODS 17). Essa integração permite que o planejamento territorial transponha as diretrizes da Agenda 2030 para a escala local, harmonizando a ocupação do solo com a preservação dos recursos naturais.

A análise de fragilidade ambiental, sistematizada por Ross (1994), fundamenta-se em dois conceitos complementares: a fragilidade potencial, que expressa a vulnerabilidade intrínseca do ambiente a partir de atributos naturais como declividade, tipo de material inconsolidado e proximidade de corpos hídricos; e a fragilidade emergente, que incorpora o efeito modificador do uso e cobertura da terra sobre essa sensibilidade natural. Tal distinção permite identificar tanto as áreas naturalmente sensíveis quanto aquelas cujo equilíbrio ecodinâmico foi perturbado pela ação antrópica, orientando prioridades de intervenção e conservação.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) potencializam essa análise ao viabilizar a integração espacial de múltiplos planos de informação de forma automatizada e reprodutível e a incorporação da lógica Fuzzy à álgebra de mapas representa um avanço metodológico relevante em relação às abordagens tradicionais, pois permite representar os atributos ambientais como gradientes contínuos de pertinência, em vez de categorias discretas, reproduzindo com maior fidelidade a complexidade e a variabilidade espacial dos processos naturais (DONHA et al., 2006).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo mapear a fragilidade potencial e emergente da bacia hidrográfica do Rio do Monjolinho, uma paisagem altamente antropizada localizada no município de São Carlos (SP), utilizando SIG e lógica Fuzzy, a fim de fornecer subsídios ao planejamento territorial e à gestão ambiental da área.

Material e Métodos

A área de estudo compreende a parcela do município de São Carlos inserida na bacia hidrográfica do Córrego do Monjolinho, correspondendo a área de 58,65 km² (Figura 01). A escolha da área de estudo justifica-se pela acentuada pressão de

expansão urbana e pela disponibilidade de cartografia em escala de detalhe. Além disso, a bacia hidrográfica é marcada por recorrentes eventos hidrológicos extremos, como inundações e alagamentos, demandando uma análise integrada que relacione a fragilidade potencial com a ocupação emergente.

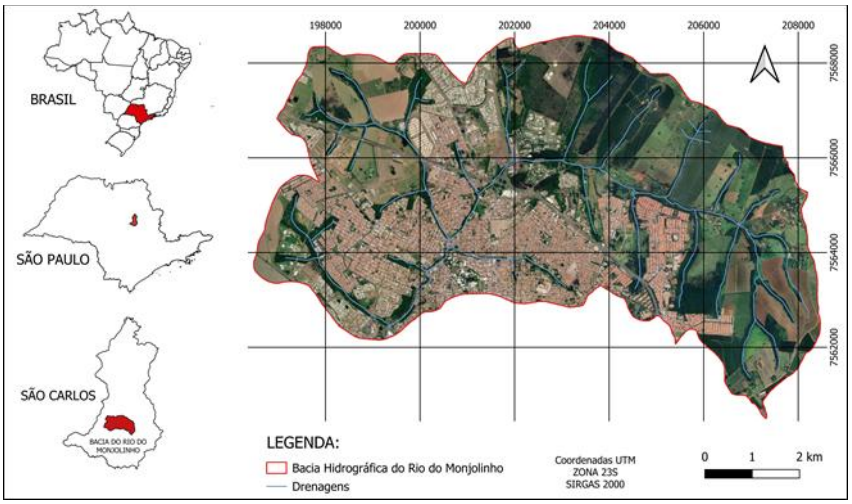


Figura 01: Localização do município de São Carlos e delimitação da bacia hidrográfica de estudo.

Todas as informações cartográficas necessárias foram preparadas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), com informações georreferenciadas, utilizando o *software* de acesso aberto QGIS (3.34.15). A Tabela 01 apresenta os atributos considerados neste estudo para avaliação da fragilidade ambiental.

Tabela 01: Atributos utilizados e suas principais características.

Atributos	Fonte	Tratamento dos dados	Relação com a fragilidade ambiental
Declividade	Folhas topográficas (1:10.000) do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC-SP).	Geração de Modelo Digital do Terreno (MDT) via interpolação por Rede Triangular Irregular - TIN (curvas de nível e pontos cotados) e derivação de declividade (%) no QGIS, classificada segundo Embrapa (2025).	Controla a velocidade do escoamento superficial e a taxa de infiltração. Altas declividades potencializam processos erosivos e movimentos de massa.
Distância das nascentes e drenagens	Hidrografia vetorizada (IGC-SP, escala 1:10.000).	Delimitação das Áreas de Preservação Permanente - APP (30m para drenagens e 50m para nascentes) via ferramenta "buffer" (Lei n° 12.651/2012, Código Florestal).	A proximidade com a rede de drenagem implica em maior susceptibilidade à inundação e instabilidade geotécnica devido ao nível freático superficial.
Materiais inconsolidados	Mapa de Materiais Inconsolidados (PONS, 2006).	Georreferenciamento e vetorização dos polígonos referentes aos diferentes tipos de materiais inconsolidados.	Determina a erodibilidade frente à força erosiva da água. Materiais com baixa coesão e alta permeabilidade facilitam a infiltração, definindo o limiar da estabilidade geológica.
Uso e ocupação do solo	Complemento "MapBiomas Collection Official" (2024).	Exportação em formato raster com a reclassificação em categorias principais (Coleção 10.1).	Os usos antrópicos tendem a alterar o balanço hídrico, transformando a fragilidade potencial.

Os dados selecionados possuem naturezas distintas: a declividade e a distância das nascentes e drenagens apresentam caráter quantitativo e contínuo, enquanto os materiais inconsolidados e o uso e ocupação do solo são expressos de forma qualitativa e discreta. Para viabilizar a análise integrada, aplicou-se a lógica Fuzzy, permitindo que as dinâmicas ambientais da bacia hidrográfica sejam representadas por gradientes de transição, o que supera a rigidez dos modelos booleanos tradicionais. Para isso, inicialmente, todos os atributos foram convertidos para arquivos matriciais seguindo uma escala comum de pertinência variando de 0,0 (menor contribuição para a fragilidade) a 1,0 (máxima contribuição).

(i) Variáveis hidrológicas (drenagens e nascentes): a análise foi processada separadamente para cursos d'água e nascentes utilizando o algoritmo "Fuzzify" do QGIS com a função de pequena associação. Esta lógica atribui valor máximo (1,0) à proximidade imediata dos corpos hídricos, decrescendo gradualmente conforme o afastamento. Após o processamento

individual, ambas as camadas foram integradas por meio do operador Fuzzy OR (Máximo), garantindo que as zonas de influência de ambos os componentes fossem preservadas no mapa de fragilidade potencial.

(ii) Declividade: enquanto na hidrografia a fragilidade diminui conforme a distância aumenta, na declividade a fragilidade aumenta conforme a inclinação aumenta. Neste caso, utilizou-se a função sigmoidal (associação de poder), estabelecendo-se o limite de 3% de declividade como pertinência mínima (0,0) e valores a partir de 25% como pertinência máxima (1,0). Esta curva permite capturar a aceleração do escoamento superficial e o potencial erosivo de forma contínua entre os intervalos definidos.

(iii) Materiais inconsolidados: foram atribuídos valores com base em suas propriedades geológico-geotécnicas e hidráulicas. Os materiais foram escalonados em níveis crescentes de contribuição à fragilidade ambiental: "Residual de Magmatitos Básicos" (0,1, fragilidade fraca), "Residual do Bauru" (0,4), "Material Orgânico" (0,7) e "Material Arenoso III" (0,9, fragilidade muito forte), transformando dados qualitativos em métricas compatíveis com a análise multicritério.

(iv) Uso e ocupação do solo: as diferentes categorias foram reclassificadas segundo o grau de contribuição para a fragilidade ambiental (Tabela 02). Atribuiu-se peso máximo (1,0) à área urbanizada devido à redução drástica da permeabilidade do solo, enquanto as classes agrícolas intensivas (0,7 a 0,8) receberam valores elevados devido ao manejo mecanizado e períodos de solo exposto, que potencializam o escoamento superficial e a erosão. Em contrapartida, as formações naturais (0,1 a 0,3) e os corpos d'água receberam os menores pesos, refletindo sua capacidade de manutenção dos serviços ecossistêmicos na bacia hidrográfica.

Tabela 02: Definição dos valores de fragilidade para os diferentes tipos de uso do solo.

Classe de uso e ocupação do solo	Atribuição Fuzzy
FLORESTA	
Formação Florestal	0,1
Formação Savânica	0,2
VEGETAÇÃO HERBÁCEA E ARBUSTIVA	
Campo Alagado	0,4
Formação Campestre	0,3
AGROPECUÁRIA	
Pastagem	0,5
Cana	0,8
Outras Lavouras Temporárias	0,8
Citrus	0,6
Outras Lavouras Perenes	0,6
Silvicultura	0,4
Mosaico de Usos	0,6
ÁREA NÃO VEGETADA	
Área Urbanizada	1,0
CORPO D'ÁGUA	
Rio, Lago	0,1

Após a padronização Fuzzy dos atributos utilizados neste estudo, os dados geográficos foram correlacionados por álgebra de mapas utilizando a ferramenta "Calculadora raster". Foram gerados mapas de fragilidade potencial e fragilidade emergente, fundamentados na metodologia de Ross (1994), mas com algumas modificações, como a adição da distância de nascentes e drenagens, cujos parâmetros de proteção seguiram as diretrizes da Lei n° 12.651/2012 (atual Código Florestal). O mapa de fragilidade potencial resultou da integração entre declividade, proximidade aos recursos hídricos e materiais inconsolidados, representando a vulnerabilidade física intrínseca da área. Visando propor que os três atributos considerados apresentam a mesma importância relativa para a análise, foram atribuídos pesos iguais para os elementos (Equação 01):

$$Fragilidade\ Potencial = \frac{(Fuzzy\ de\ Declividade + Fuzzy\ de\ APP + Fuzzy\ de\ Materiais\ Inconsolidados)}{3} \quad (01)$$

Já, a fragilidade emergente foi consolidada com a sobreposição do mapa de fragilidade potencial e o mapa Fuzzy referente ao uso e ocupação atual do solo, com o cálculo da média aritmética simples dos valores, permitindo diagnosticar o desequilíbrio ecodinâmico gerado pela interação entre as atividades antrópicas e a sensibilidade natural do território.

Os mapas de fragilidade potencial e fragilidade emergente foram reclassificados pelo método de intervalos iguais em cinco categorias distintas de fragilidade: muito baixa (0,0 a 0,2), baixa (0,2 a 0,4), média (0,4 a 0,6), alta (0,6 a 0,8) e muito alta (0,8 a 1,0).

Resultados e Discussão

A caracterização dos atributos físico-ambientais da bacia hidrográfica do Rio do Monjolinho (Figura 02) revelou um território marcado pelo predomínio de relevos suaves e materiais geológicos de elevada suscetibilidade erosiva, sobre os quais se sobrepõe intensa pressão de urbanização.

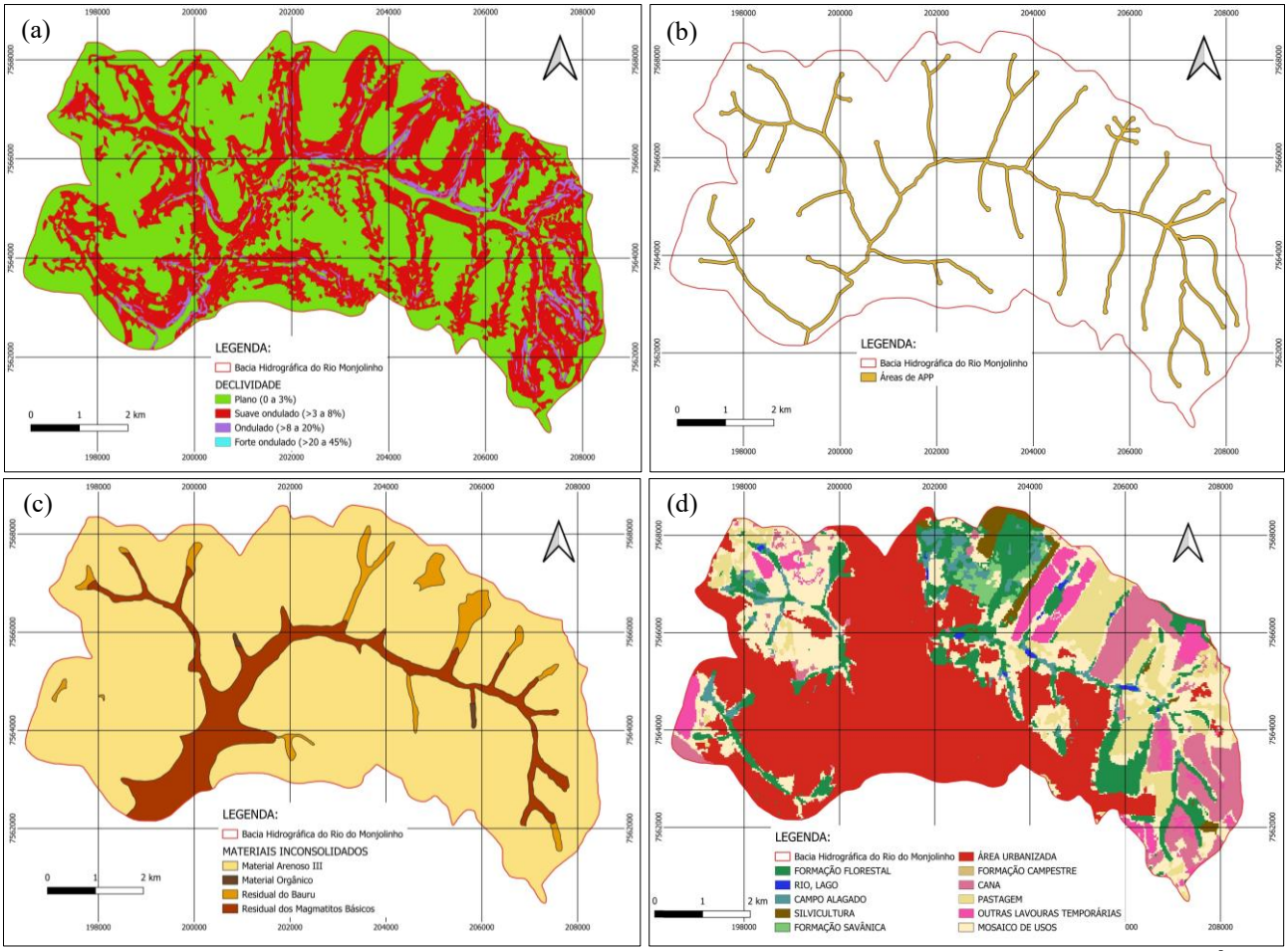


Figura 02: Caracterização da bacia hidrográfica do Rio do Monjolinho, São Carlos (SP): (a) declividade; (b) Áreas de Preservação Permanente; (c) materiais inconsolidados; (d) uso e ocupação do solo.

Em relação à declividade, a bacia hidrográfica apresenta terreno predominantemente plano (32 km²; 54,6%) e suave ondulado (25 km²; 42,6%), com ocorrência restrita de relevo ondulado (2 km²; 3,4%) e ausência expressiva de classes de maior inclinação (Figura 02a). A baixa declividade favorece a infiltração e reduz o escoamento superficial em condições naturais, considerando um terreno de baixa fragilidade ambiental.

As Áreas de Preservação Permanente mapeadas totalizam aproximadamente 4 km² (6,8% da bacia), correspondendo às faixas de 30 m ao longo de cursos d'água e 50 m ao redor de nascentes, conforme a Lei n° 12.651/2012 (Figura 02b). A proximidade imediata aos corpos hídricos implica maior susceptibilidade a inundações, instabilidade geotécnica associada ao nível freático superficial e vulnerabilidade à contaminação de aquíferos. Trata-se, portanto, das áreas de maior sensibilidade hídrica intrínseca da bacia, razão pela qual o Código Florestal as protege com restrição ao uso antrópico. As demais áreas (93,2%) constituem regiões não sujeitas a essa proteção legal de caráter hídrico, embora parte delas possam apresentar fragilidade elevada por outros atributos, como a erodibilidade do Material Arenoso III ou a impermeabilização decorrente da urbanização.

Quanto aos materiais inconsolidados, o Material Arenoso III domina amplamente a bacia (Figura 02c), cobrindo cerca de 51 km² (87,0% da área) e caracterizando-se pela elevada suscetibilidade a processos erosivos devido aos indícios de retrabalhamento e transporte significativo (PONS, 2006). O Residual dos Magmatitos Básicos ocupa aproximadamente 6 km² (10,2%), distribuindo-se principalmente ao longo dos vales fluviais e nas porções central e leste da bacia, onde segue os eixos de drenagem e exibe baixa profundidade, com solos de textura predominantemente argilosos (MURO, 2000). O Residual do Bauru contribui com 2 km² (3,4%) da área total, localizando-se estrategicamente nas proximidades de diversas nascentes da bacia, enquanto o Material Orgânico apresenta ocorrência residual, restrito aos setores de fundo de vale com maior saturação hídrica.

O uso e ocupação do solo revela a dominância da Área Urbanizada (Figura 02d), que ocupa 25,4 km² (43,3% da bacia), concentrada principalmente na porção oeste e centro-sul, correspondendo ao tecido urbano de São Carlos. A presença de Formação Florestal (6,7 km²; 11,4%) concentra-se preferencialmente nas margens dos cursos d'água, indicando remanescentes de mata ciliar, enquanto as atividades agropecuárias predominam na porção leste da bacia (24,3 km²; 41,4%). Complementarmente, a interpretação de imagens de satélite demonstra que a cobertura vegetal ciliar não é contínua, indicando supressão de APP nas zonas de maior pressão antrópica decorrente da intensiva ocupação urbana e das atividades agropecuárias.

O mapa de fragilidade ambiental potencial (Figura 03) exibe padrão espacial marcadamente dendrítico, estruturado pela rede de drenagem. Essa configuração evidencia o forte controle hidrológico e topográfico sobre a bacia, onde a fragilidade se

intensifica à medida que a proximidade com os corpos d'água aumenta. Apesar da matriz predominante de estabilidade, os setores críticos formam corredores contínuos, o que demanda atenção especial no planejamento do uso e ocupação do solo para evitar processos erosivos e degradação das áreas de APP.

Analisando-se os resultados obtidos do cruzamento deste mapa com cada um dos atributos, como mostra a Tabela 03, percebe-se que a classe de baixa fragilidade (37,26 km²; 63,53%) concentra-se nas áreas de relevo plano a suave ondulado, onde a reduzida influência da declividade (pertinência próxima a zero) atua como um fator de estabilização que atenua a elevada erodibilidade do Material Arenoso III (pertinência 0,9), material inconsolidado predominante na bacia hidrográfica.

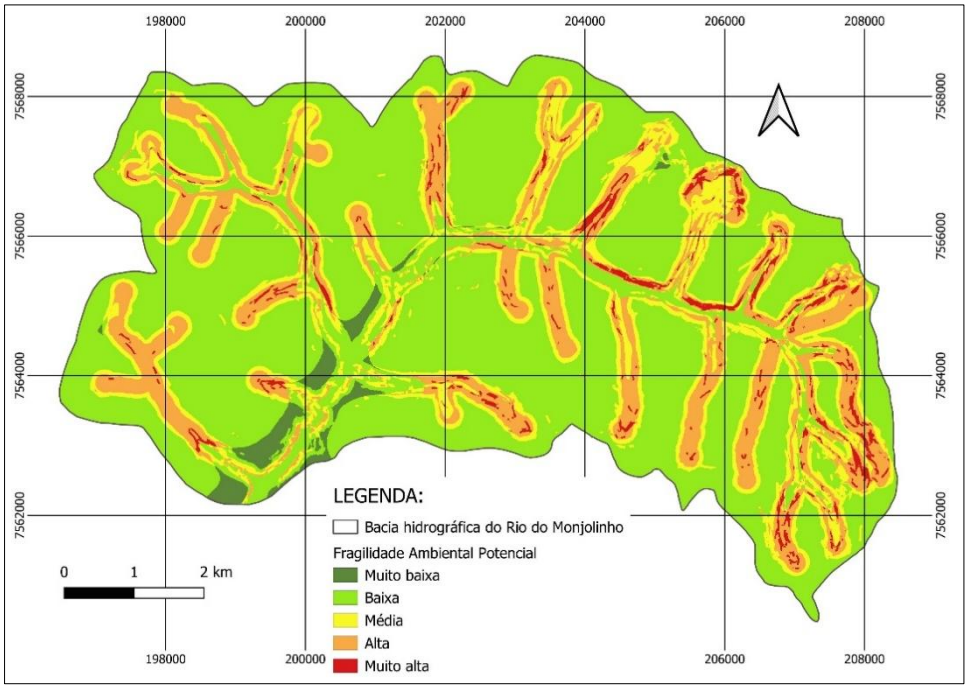


Figura 03: Mapa de fragilidade potencial da bacia hidrográfica do Rio do Monjolinho.

Tabela 03: Quantificação dos atributos em cada classe de fragilidade potencial.

Classes de fragilidade potencial	Declividade			Distância das nascentes e drenagens			Materiais inconsolidados		
	Classe	**Área (m²)**	**%**	**Classe**	**Área (m²)**	**%**	**Classe**	**Área (m²)**	**%**
Muito baixa	0-3%	15.776	37,22	APP	0	0,00	RB	1.173	2,77
	>3-8%	26.614	62,78	não APP	42.390	100,00	RMB	41.217	97,23
	Subtotal	**42.390**	**100**	**Subtotal**	**42.390**	**100**	**Subtotal**	42.390	100
Baixa	0-3%	1.087.599	72,87	APP	51.987	3,48	MAIII	1.370.283	91,81
	>3-8%	403.045	27,01	não APP	1.440.474	96,52	RB	1.956	0,13
	>8-20%	1.817	0,12	**Subtotal**	**14.92.461**	**100**	RMB	120.222	8,06
	Subtotal	**1.492.461**	**100**				**Subtotal**	1.492.461	100
Média	0-3%	95.073	24,74	APP	36.224	9,43	MAIII	268.479	69,87
	>3-8%	278.360	72,44	não APP	348.045	90,57	RB	51.738	13,46
	>8-20%	10.779	2,81	**Subtotal**	**384.269**	**100**	RMB	61.997	16,13
	>20-45%	57	0,01				MO	2.068	0,54
	Subtotal	**384.269**	**100**				**Subtotal**	384.282	100
Alta	0-3%	72.151	19,14	APP	63.104	16,74	MAIII	345.849	91,71
	>3-8%	268.303	71,16	não APP	313.926	83,26	RB	13.265	3,52
	>8-20%	35.885	9,52	**Subtotal**	**377.030**	**100**	RMB	17.097	4,53
	>20-45%	691	0,18				MO	883	0,23
	Subtotal	**377.030**	**100**				**Subtotal**	377.094	100
Muito alta	>3-8%	7.654	14,39	APP	7.918	14,88	MAIII	52.041	97,83
	>8-20%	45.065	84,72	não APP	45.278	85,12	RB	1.155	2,17
	>20-45%	477	0,90	**Subtotal**	**53.196**	**100**	**Subtotal**	53.196	100
	Subtotal	**53.196**	**100**						

APP: Área de Preservação Permanente; MAIII: Material Arenoso III; RB: Residual do Bauru; RMB: Residual dos Magmatitos Básicos; MO: Material Orgânico.

As classes de fragilidade alta e muito alta (10,74 km²; 18,31%) distribuem-se acompanhando o traçado ramificado da rede de drenagem, resultado da sobreposição de dois fatores: a pertinência hidrológica máxima atribuída às áreas de APP pela proximidade imediata aos corpos hídricos, e a declividade localmente mais acentuada nas vertentes que margeiam os talvegues, que contribui positivamente para o valor Fuzzy composto nessas zonas de transição.

A classe de fragilidade muito baixa (1,06 km²; 1,80%) ocorre de forma pontual, onde o Residual dos Magmatitos Básicos aflora em setores distantes da rede de drenagem. Nessas áreas, a convergência entre o mínimo potencial geológico e a reduzida influência hidrológica resulta nos menores índices de vulnerabilidade da bacia.

Já a classe média (9,59 km²; 16,36%) estabelece uma zona de transição nas bordas das áreas de APP; nesses locais, embora o peso do fator hidrológico seja decrescente, ele ainda permanece relevante, somando-se à declividade suave ondulada para elevar o grau de fragilidade ambiental.

No mapa de fragilidade ambiental emergente (Figura 04), a incorporação do uso e ocupação do solo provoca uma inversão radical da distribuição espacial observada na fragilidade potencial. O padrão dendrítico desaparece e é substituído por uma matriz contínua de alta fragilidade (28,01 km², 47,77%) que domina toda a porção centro-oeste da bacia, correspondendo diretamente à mancha urbana consolidada (uso que recebe pertinência Fuzzy máxima por sua impermeabilização quase total), como mostrado na Tabela 04.

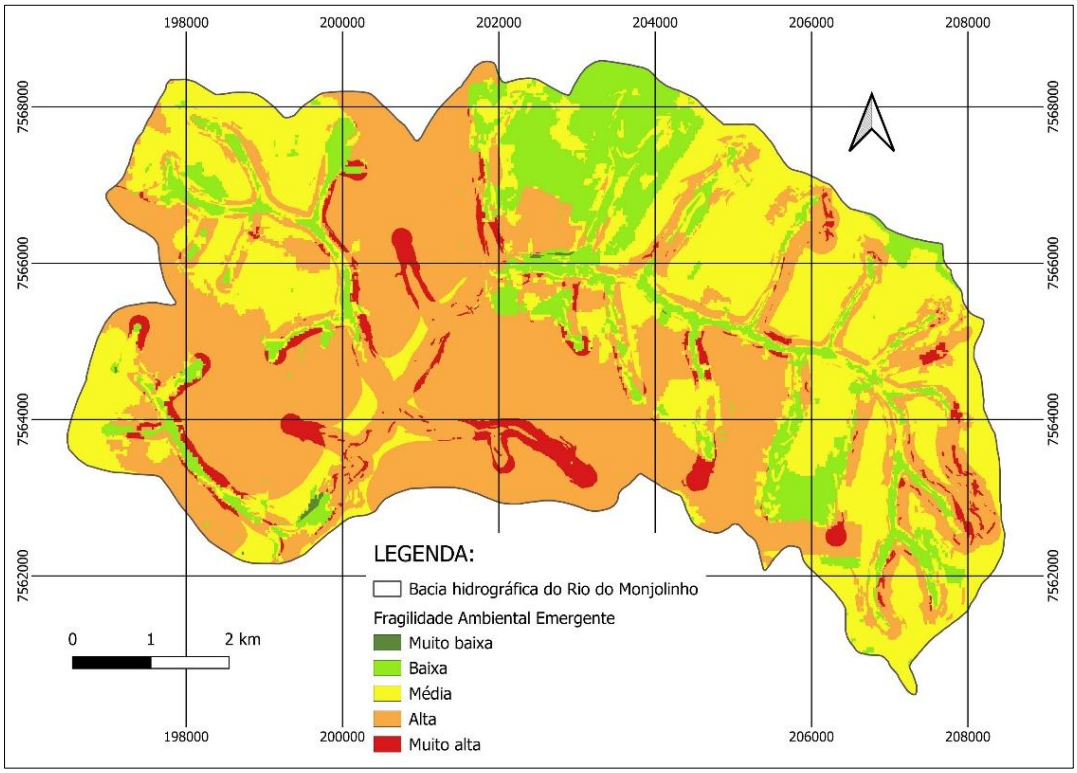


Figura 04: Mapa de fragilidade emergente da bacia hidrográfica do Rio do Monjolinho.

A classe de fragilidade muito alta (2,35 km², 4,00%) concentra-se em dois contextos espaciais distintos: (i) os canais que atravessam o tecido urbano, onde se sobrepõem pertinência hidrológica máxima e materiais arenosos de alta erodibilidade, configurando os pontos de maior risco a inundação e erosão marginal; e (ii) os núcleos de expansão urbana recente sobre vertentes de declividade mais acentuada.

As porções laterais da bacia, onde predominam usos agropecuários e remanescentes de vegetação nativa, mantém fragilidade emergente majoritariamente média, evidenciando que mesmo usos antrópicos de menor impacto já elevam a fragilidade em relação ao potencial, mas sem o efeito abrupto da urbanização. Nesta categoria se destacam mosaico de usos, pastagens, cana e outras lavouras temporárias.

As manchas de baixa fragilidade emergente (8,22 km², 14,02%) coincidem espacialmente com os remanescentes de formação florestal, demonstrando que a manutenção da cobertura vegetal nativa é o principal fator de contenção da fragilidade emergente na bacia hidrográfica, exercendo um papel fundamental na proteção do solo contra o impacto direto das chuvas e na promoção da infiltração hídrica.

Por conseguinte, a classe de fragilidade muito baixa, embora represente uma parcela muito pequena da bacia (apenas 0,08%), está vinculada exclusivamente às áreas de formação florestal. A reduzida abrangência territorial dessa classe evidencia a escassez de ambientes em estado de equilíbrio ecológico pleno dentro da bacia, reforçando que, na ausência da vegetação original, a fragilidade tende a migrar para níveis moderados ou altos devido às características geológicas e pedológicas locais.

Tabela 04: Quantificação das classes de uso do solo em cada classe de fragilidade emergente.

Classes de fragilidade emergente	Uso atual	Área (m²)	%
Muito baixa	Formação florestal	468	100,00
	Subtotal	**468**	**100**
Baixa	Formação florestal	57.808	70,08
	Rio, lago	1.538	1,86
	Campo alagado	7.440	9,02
	Silvicultura	8.663	10,50
	Formação savânica	6.562	7,96
	Formação campestre	34	0,04
	Pastagem	35	0,04
	Mosaico de usos	408	0,49
	Subtotal	**82.488**	**100**
Média	Formação florestal	8.465	4,23
	Rio, lago	107	0,05
	Campo alagado	9.481	4,73
	Silvicultura	564	0,28
	Formação savânica	248	0,12
	Citrus	42	0,02
	Área urbanizada	9.835	4,91
	Cana	24.961	12,46
	Outra lavouras perenes	32	0,02
	Pastagem	42.946	21,44
	Outras lavouras temporárias	22.870	11,42
	Mosaico de usos	80.751	40,31
	Subtotal	**200.302**	**100**
Alta	Campo alagado	417	0,15
	Silvicultura	161	0,06
	Área urbanizada	222.631	79,31
	Cana	19.349	6,89
	Pastagem	3.669	1,31
	Outras lavouras temporárias	5.635	2,01
	Mosaico de usos	28.859	10,28
	Subtotal	**280.721**	**100**
Muito alta	Área urbanizada	20.568	88,14
	Cana	2.577	11,04
	Outras lavouras temporárias	190	0,81
	Subtotal	**23.335**	**100**

A comparação entre os dois mapas (Figuras 03 e 04), corroborada pelos dados da Tabela 05, torna evidente que o principal vetor de agravamento ambiental não é a sensibilidade física intrínseca do território, que é predominantemente baixa, mas sim o padrão de ocupação urbana que avança sobre a bacia hidrográfica analisada. Assim, o fator determinante para a desestabilização do sistema é, de fato, o modelo de expansão urbana e agropecuária, que ignora as aptidões naturais do terreno e converte áreas originalmente estáveis em setores de alto risco ambiental.

Tabela 05: Quantificação dos mapas de fragilidade potencial e emergente.

Classe	Fragilidade Potencial		Fragilidade Emergente	
	Área (km²)	%	Área (km²)	%
Muito baixa	1,06	1,80	0,05	0,08
Baixa	37,26	63,53	8,22	14,02
Média	9,59	16,36	20,02	34,13
Alta	9,41	16,05	28,01	47,77
Muito baixa	1,06	1,80	0,05	0,08

Comentários finais

Os resultados evidenciam que, embora as condições físico-naturais da bacia confiram fragilidade potencial predominantemente baixa, a intensa urbanização, que ocupa 42,6% da área, transforma radicalmente esse quadro: na fragilidade

emergente, 51,77% da bacia encontra-se nas classes alta e muito alta, indicando grave desequilíbrio ecodinâmico. As áreas de APP mapeadas totalizam apenas 4 km², e a pressão urbana sobre essas zonas de proteção constitui fator agravante dos recorrentes eventos de inundação na bacia hidrográfica. Os produtos cartográficos gerados, particularmente os mapas de fragilidade potencial e emergente, constituem subsídios concretos para o planejamento territorial e ambiental, podendo orientar a definição de zonas prioritárias de intervenção, restrição ao parcelamento do solo e recuperação de vegetação nativa. Como perspectivas futuras, recomenda-se a incorporação de dados de erosão laminar e de registros históricos de inundação para validação dos padrões mapeados, bem como a atualização periódica do mapa de uso do solo para monitoramento da dinâmica de expansão urbana sobre áreas de maior fragilidade.

Agradecimentos

As autoras gostariam de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio recebido (n° Processo 2025/14118-0).

Referências Bibliográficas

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2012.

DONHA, A. G.; SOUZA, L. C. P.; SUGAMOSTO, M. L. Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, n. 1, p. 175-181, 2006.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 6. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: EMBRAPA, 2025. 393 p. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1176834. Acesso em: 8 abr. 2026.

MAPBIOMAS. *Coleção 10.1 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra no Brasil*. Disponível em: <https://mapbiomas.org>. Acesso em: abr. 2026.

MURO, M. D. *Carta de zoneamento para seleção de áreas frente à instalação de aterros sanitários no município de São Carlos-SP*. 2000. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

PONS, N. A. D. *Levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas na cidade de São Carlos - SP, com auxílio de geoprocessamento*. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. *Revista do Departamento de Geografia*, São Paulo, n. 8, p. 3-74, 1994.

ANÁLISE DA RECUPERAÇÃO AMBIENTAL POR ABANDONO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO NO MUNICÍPIO DE MAFRA, SANTA CATARINA, BRASIL

1 Luiz Carlos Weinschutz, 2 Maurício Rodrigo Schmitt, 3 Sidney Eiselt, 4 Maristela Povaluk
1 Universidade do Contestado, e-mail: luizw@unc.br; 2 Universidade do Contestado, e-mail: mauricio.schmitt@unc.br; 3 Universidade do Contestado, e-mail: sidney.eiselt@aluno.unc.br; 4 Universidade do Contestado, e-mail: maristela@unc.br;

Palavras-chave: Áreas degradadas; mineração; Sentinel 2; NDVI

Resumo

A mineração de materiais de emprego direto na manutenção de estradas vicinais é uma atividade histórica no município de Mafra, SC. Devido à geologia local, composta por rochas sedimentares do Grupo Itararé, a exploração gerou inúmeras cavas que, após o esgotamento mineral, foram frequentemente abandonadas sem a devida execução de Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD). Este trabalho analisa a eficácia da regeneração ambiental em quatro pedreiras desativadas há pelo menos 15 anos: Bela Vista, Rio Butiá, Vila Gren e Vila Ruthes. O objetivo central foi comparar trajetórias sucessionais distintas, regeneração passiva (por abandono), catalisada (com manejo leve) e ativa (com intervenção mecânica), utilizando ferramentas de sensoriamento remoto e atividades de campo. A metodologia consistiu no processamento de imagens multiespectrais da constelação Sentinel-2 (ESA), nível L2A, comparando os períodos de abril de 2016 e março de 2026. Foram calculados os índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e analisadas as assinaturas espectrais nas bandas do visível e infravermelho (NIR e SWIR), além de imagens de satélite do Google Earth Pro, com histórico de 2004, 2016 e 2025. A validação técnica foi realizada por meio de levantamento fotográfico *in situ* para a identificação da composição florística dominante. Os resultados demonstram que o monitoramento orbital é altamente sensível às variações de manejo. As pedreiras Bela Vista e Rio Butiá, que sofreram regeneração passiva, atingiram o clímax sucessional para o período analisado, com NDVIs superiores a 0.80, indicando estabilização da biomassa e alta retenção de umidade no solo (redução na banda B12, SWIR 2). A Pedreira Vila Ruthes destacou-se pelo maior incremento relativo de vigor vegetativo (NDVI +81,6%), resultado de uma regeneração natural catalisada por intervenções pontuais do proprietário, o que mascarou o substrato rochoso (redução de 47,9% na reflectância da banda B04). Inversamente, a Pedreira Vila Gren apresentou um recuo temporário nos índices espectrais (queda de 4,3% no NDVI), sinalizando o impacto visual de intervenções mecânicas recentes da prefeitura para reabilitação do solo, o que demonstra a capacidade do satélite em auditar obras de engenharia ambiental em tempo real. Contudo, a análise crítica destaca que o "reverdecimento" detectado via satélite deve ser interpretado com cautela. A observação de campo revelou que a densificação da cobertura vegetal nas áreas de abandono e manejo leve é dominada por espécies exóticas invasoras, como *Pinus* spp. e *Hovenia dulcis*. Essas espécies colonizam rapidamente o substrato degradado, criando um dossel denso que eleva o NDVI, mas que pode comprometer a biodiversidade nativa da Mata Atlântica a longo prazo. Conclui-se que a integração do sensoriamento remoto com acompanhamento de campo é a abordagem ideal para a gestão de passivos minerários, permitindo uma fiscalização eficiente da cobertura de solo, embora demande vistorias locais para atestar a qualidade biótica da restauração ecológica.

Introdução

O município de Mafra está localizado no planalto norte do estado de Santa Catarina na divisa com o estado do Paraná (Figura 1), e tem 1.404km² de área, o 4º maior município em extensão do estado, e conta com aproximadamente 2.000km de estradas rurais com pavimentação primária, sua economia é baseada no comércio e prestação de serviços, e principalmente na atividade agropecuária, o que demanda estradas em boas condições para receber insumos e escoar a produção, além de atender o transporte estudantil e da população rural ao centro urbano.

A explotação de material mineral de uso direto na recuperação de estradas, como cascalho, saibro ou rochas sedimentares friáveis, é comum em municípios extensos e com grande malha de rodovias vicinais, como no caso do município de Mafra, cuja a geologia é representada pela ocorrência de rochas sedimentares como diamictitos, ritmitos e siltitos, pertencentes ao Grupo Itararé da Bacia Sedimentar do Paraná (Weinschutz e Castro, 2005), que embora sejam relativamente friáveis necessitam para sua explotação do uso de explosivos, mas quando aplicado no leito carroçável apresentam baixa resistência, principalmente dada pela fragmentação do material pela variação de temperatura e pela absorção de água, necessitando constante reposição de material rochoso, e por consequência da abertura de pedreiras. Mafra em várias décadas explorou dezenas de pedreiras em seu território, mas atualmente detêm o direito minerário e as licenças ambientais de apenas uma delas, a pedreira de São Lourenço, as demais áreas estão sendo exploradas pela iniciativa privada, mas na sua maioria estão abandonadas, seja por não serem mais economicamente viáveis, por falta de acordo com o superficiário, ou/e por não atenderem às exigências ambientais.

Um dos maiores passivos da exploração mineral é o impacto ambiental, causado principalmente pelo desmatamento, poluição hídrica, poluição sonora, subsidências do terreno, assoreamento de rios, impactos visuais e paisagísticos (Mechi e Sanches, 2010). Devido ao grande impacto ambiental da atividade, a mineração tem o dever de promover a Recuperação de Áreas Degradadas (RAD), imposta pela constituição federal (Brasil, 1988). Uma área degradada é uma área “impossibilitada de

retornar por uma trajetória natural a um ecossistema que se assemelhe ao estado inicial, dificilmente sendo restaurada, apenas recuperada" e a recuperação como a "restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada a uma condição não degradada, que pode ser diferente de sua condição original" (ICMBIO, 2014). Esse processo de recuperação pode ser conduzido de maneira natural, sem nenhuma interferência humana, ou com uma condução da regeneração, visando a recuperação mais acelerada da área.

Diante da extensão territorial do município e da dispersão dessas áreas, o monitoramento convencional via vistorias de campo torna-se logisticamente complexo e oneroso. Nesse cenário, o uso de Geotecnologias, especificamente o sensoriamento remoto orbital, apresenta-se como uma solução robusta para a avaliação ambiental sistemática. A constelação de satélites Sentinel-2 (Agência Espacial Europeia - ESA), com sua alta resolução temporal e sensores multiespectrais, permite não apenas a visualização óptica, mas a quantificação do vigor vegetativo por meio de índices como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). A análise dessas assinaturas espectrais ao longo de séries temporais possibilita identificar a trajetória sucessional de cada área, distinguindo o desenvolvimento espontâneo de biomassa das intervenções de manejo ativo, fornecendo indicadores precisos para a avaliação do sucesso da Recuperação de Áreas Degradadas (RAD).

Este trabalho tem por objetivo comparar o comportamento da regeneração vegetal através do monitoramento de imagens do sistema Sentinel-2 e dados de campo, de quatro áreas exploradas há pelo menos 15 anos, sendo duas abandonadas sem ações de recuperação planejadas, uma pedreira que apresenta projeto de recuperação em andamento, e uma onde foram realizadas ações de recomposição e recuperação planejadas.

Metodologia

Para a seleção das pedreiras, inicialmente foi obtido junto ao setor de engenharia da Prefeitura Municipal de Mafra, informações sobre as principais áreas de exploração mineral das substâncias siltito, diamictito e cascalho, abandonadas e em recuperação, e que tiveram sua exploração paralisada a pelo menos 15 anos, sendo selecionadas quatro áreas para realização do estudo (Figura 1). Sendo estas, a Pedreira Bela Vista (recuperação por abandono), Rio Butiá (recuperação por abandono), Vila Gren (recuperação em andamento) e Vila Ruthes (resuperação parcial).

Os limites para geoprocessamento foram elaborados com o uso da ferramenta do Google Earth Pro em conjunto com servidores da prefeitura, esses polígonos foram exportados em formato kml e importados no sistema Copernicus Data Space Ecosystem para a obtenção dos dados Sentinel 2. Adicionalmente, as áreas das pedreiras foram observadas com o auxílio da ferramenta de Imagens Históricas, do Google Earth, resultando em imagens de satélite de boa qualidade dos anos de 2004 a 2025, para a análise visual da recuperação da vegetação. Para padronização, todas as pedreiras foram analisadas com as mesmas datas, as imagens de satélite foram obtidas de 2004, 2016 e 2025 (com exceção de uma pedreira que não possui), e os dados Sentinel 2 de 20/04/2016 e 29/03/2026.

A avaliação do processo de regeneração por abandono ou induzida nas áreas degradadas pela mineração de cascalho e siltito foi conduzida por meio do processamento digital de imagens multiespectrais seguindo a metodologia dividida nas seguintes etapas principais:

1. Aquisição de Dados e Plataformas

Para o monitoramento multitemporal, foram utilizados dados do sensor MSI (MultiSpectral Instrument) a bordo da constelação de satélites Sentinel-2 (ESA). O processamento dos dados foi realizado através da plataforma Copernicus, utilizando o nível de processamento L2A (correção atmosférica Bottom-of-Atmosphere). Foram selecionados dois marcos temporais principais para a comparação: Cenário Passado: 20 de Abril de 2016 (início da disponibilidade de dados Sentinel-2 de alta qualidade) e Cenário Atual: 29 de Março de 2026 (estado atual de recuperação).

2. Índices de Vegetação e Assinaturas Espectrais

A avaliação do vigor vegetativo e da biomassa foi realizada através do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), calculado pela razão entre as bandas do infravermelho próximo (B08) e do vermelho (B04):

$$NDVI = \frac{B08 - B04}{B08 + B04}$$

Além do NDVI, foi extraído o Perfil de Assinatura Espectral de cada unidade, analisando a reflectância em 12 bandas (do visível ao infravermelho de onda curta - SWIR). Essa técnica permitiu diferenciar alvos como solo exposto, rocha e diferentes tipos de cobertura vegetal, utilizando curvas de referência padrão para validação dos dados orbitais.

3. Validação de Campo e Série Temporal

A validação dos dados orbitais foi realizada por meio de levantamentos fotográficos in situ realizados em 2026. Complementarmente, foi gerada uma Série Temporal de 5 anos para o NDVI de cada área, visando identificar a estabilidade da sucessão ecológica e descartar variações sazonais ou eventos de seca isolados.

4. Análise Comparativa

Os resultados foram organizados em matrizes comparativas, cruzando os dados quantitativos de reflectância com as informações históricas de manejo de cada pedreira. A variação percentual (Δ%) entre 2016 e 2026 para as bandas críticas (B04, B08 e B12) foi utilizada como o principal indicador de sucesso ou retrocesso na recuperação ambiental.

Os mapas de localização foram elaborados com o software QGis 3.42.3 com dados de SIG do estado de Santa Catarina e IBGE, e as imagens de campo, foram tiradas com câmera Canon EOS Rebel T6 e as pranchas elaboradas com o Inkscape 1.4.3., ambos softwares de livre acesso.

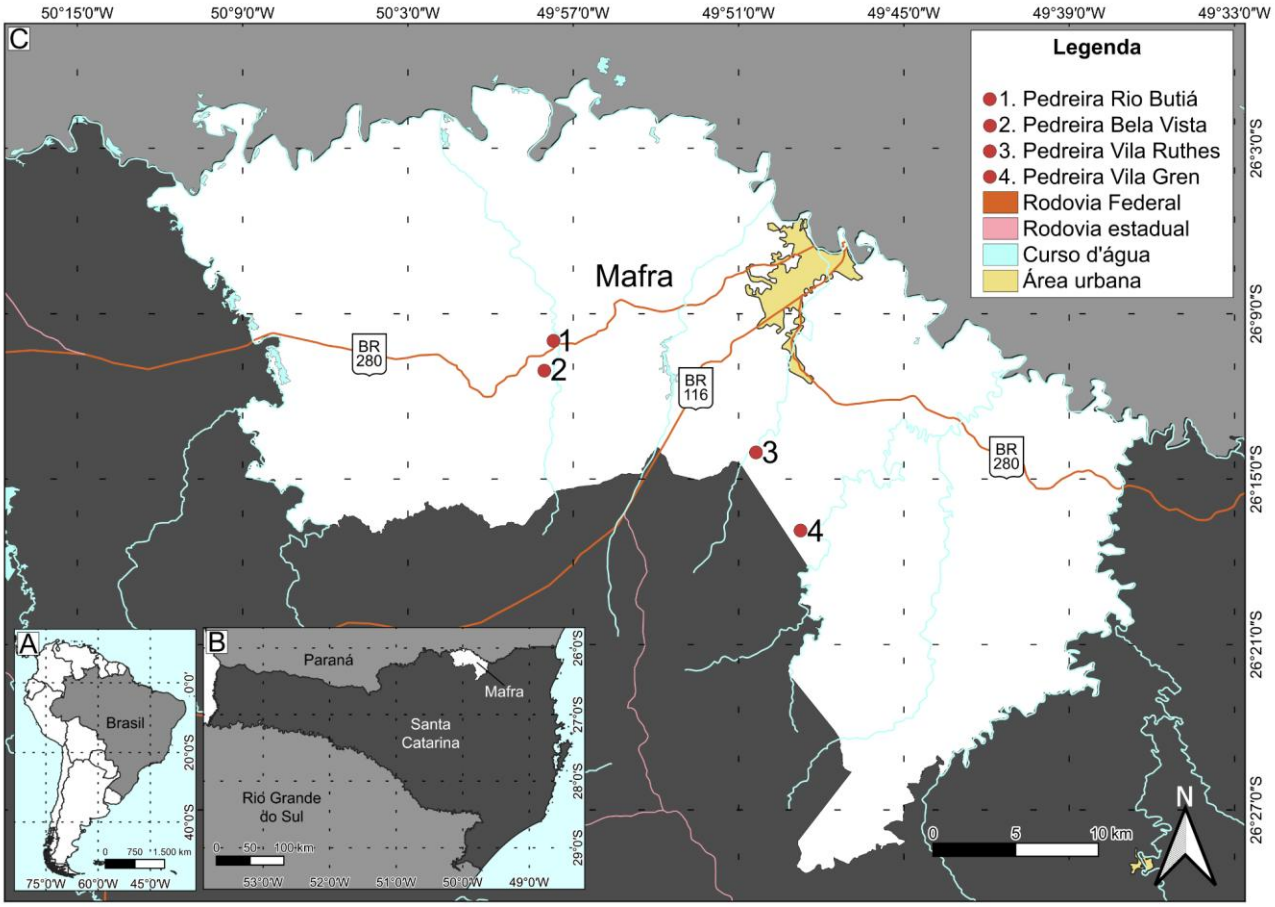


Figura 1. Mapa de localização das pedreiras estudadas. A. Mapa da América do Sul, com destaque para o Brasil; B. Mapa do estado de Santa Catarina, com destaque para o município de Mafra; C. Mapa de Mafra e demais marcações destacadas na legenda.

Resultados

A primeira e maior pedreira analisada, Bela Vista, segundo relatos de moradores locais, teve sua explotação iniciada no início dos anos 60, tendo seu auge de extração de minério entre 1980 e 2010, litologicamente constituída de ritmitos de siltito e folhelho, recoberta no topo por arenitos friáveis, considerados material estéril, e que devido ao aumento de sua espessura com o avanço da lavra determinaram seu abandono pelo alto custo de explotação. Esta pedreira foi explotada em grande parte do tempo sem autorização mineral ou licenciamento ambiental, estando abandonada há pelo menos 20 anos, sem ter sofrido qualquer ação de reconformação do talude, ou recuperação de vegetação, permanecendo com um talude verticalizado com altura próxima a 35m, e sua base devido a falta de controle de drenagem tornou um lago raso (40cm) em quase toda sua extensão.

Com relação ao estágio atual de ocupação vegetal, fica evidente que a bancada superior e a entrada da pedreira apresenta expressiva cobertura vegetal em estágio intermediário de recuperação, com domínio de árvores e arbustos, no talude, a parede de rocha está recoberta por musgos e liquens, e sua base, devido a presença de água apresenta vegetação típica de ambientes lênticos, com a presença de espécies aquáticas (e.g. *Heteranthera reniformis, Pistia stratiotes*) e de ambientes alagados (e.g. *Typha* sp., *Ludwigia* sp.). Na observação das imagens de satélite, é visível que na imagem mais antiga (2004), boa parte da pedreira já possuía uma vegetação consideravelmente desenvolvida (Fig. 2A), e que vem se desenvolvendo desde então, como visto nas imagens de 2016 (Fig. 2B) e 2025 (Fig. 2D). Nas análises dos dados de NDVI, a pedreira Bela Vista já apresentava um índice de vegetação robusto em 2016 (NDVI = 0.79), indicando que o processo de recuperação já estava bem estabelecido (Fig. 2C) e em 2026 avança para NDVI = 0.81, indicando um avançado estágio de regeneração. A banda B04 (Vermelho) se manteve baixa, 0.0270 em 2016 e 0.0240 em 2026 demonstrando que a vegetação absorve grande parte da luz emitida, indicando uma alta taxa fotossintética. O aumento de 5,7% nos valores de NIR (B08) indicam que ao longo da década, a floresta, que já era bem estruturada, teve um aumento na complexidade estrutural do dossel e na densidade foliar. O último índice, SWIR 2 (B12) apresenta um valor de 0.0685, indicando um ambiente muito úmido e com solo rico em matéria orgânica. De acordo com os dados de satélite e espectrais, se conclui que a pedreira está em um estado intermediário a avançado de recuperação, com grande densidade vegetal e índices de umidade.

Na etapa de validação em campo (Fig. 2F), podemos observar que a área de cava da pedreira, não recuperada, formou uma área alagada, que ajuda a explicar o índice de SWIR 2. A vegetação arbórea, dos arredores da cava de exploração, é claramente diferenciada na mata nativa, não removida na época de exploração, e a vegetação colonizadora das áreas degradadas.

Enquanto que na face oeste/noroeste da pedreira apresenta uma mata com espécies nativas, a porção leste/nordeste apresenta um domínio de *Pinus* sp., espécie exótica e com grande potencial invasor. Espécimes de *Pinus* sp. também ocorrem esparsos na base da pedreira, nas margens do lago, indicando que a população está se expandindo e necessita de controle.

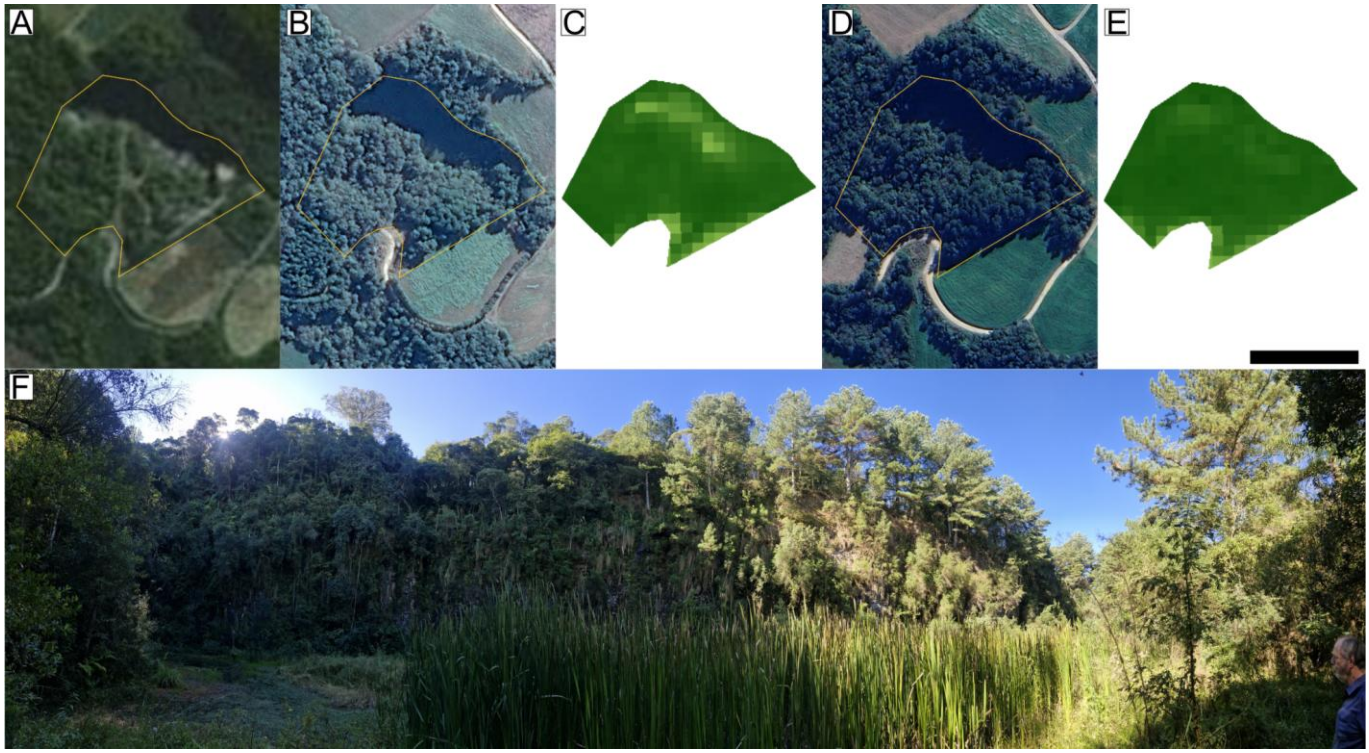


Figura 2. Evolução temporal e estado atual da Pedreira Bela Vista. A. Imagem de satélite da área em 2004. B. Imagem de satélite de 2016. C. Mapa de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) de 20/04/2016, com tons de verde indicando a presença de vegetação já estabelecida e pioneira. D. Imagem de satélite de 2025, revelando o fechamento do dossel e a expansão da área florestada. E. Mapa de NDVI de 29/03/2026, onde a homogeneidade dos tons de verde escuro confirma a estabilização de biomassa e alto vigor vegetativo. F. Registro fotográfico panorâmico de campo (2026), comprovando a formação de uma estrutura vegetal. A escala equivale a 100m. A,B,D, Google Earth; C,E. NDVI Sentinel 2.

Indicador	2016	2026	Variação
B04 (Vermelho)	0.0270	0.0240	-11,1%
B08 (NIR)	0.2362	0.2497	+5,7%
B12 (SWIR 2)	0.0730	0.0685	-6,1%
NDVI	0.79	0.82	+3,8%

Tabela 1. Índices da Pedreira Bela Vista coletados através dos dados Sentinel 2, em 20/04/2016 e 29/03/2026.

Outra pedreira abandonada após o término de sua lavra, sem a execução de ações de recuperação é a pedreira do Rio Butiá, localizada às margens do rio com o mesmo nome, na localidade de Bela Vista do Sul, próximo a rodovia BR 280. Essa pedreira compreende um talude único com aproximadamente 20m de altura, com a ocorrência de um siltito silicificado, com fraturas verticalizadas preenchidas por conglomerados, e no topo um fino siltito rico em fósseis de braquiópodes e bivalves. Sua exploração iniciou também na década de 60, com seu auge de explotação até os anos 80, findando sua operação nos anos 90. Atualmente é observado na bancada superior e bordas da pedreira a presença de vegetação arbórea e arbustiva, com indivíduos ultrapassando 15 m, e na sua base, caracterizada pelo lago formado após o abandono da área, principalmente vegetação típica de ambientes úmidos, rasos e de baixa circulação, dominada por populações de *Typha* sp.. Na observação temporal através de imagens de satélite é possível verificar que a ocupação vegetal se deu de forma constante, com a predominância de áreas vegetadas desde os registros mais antigos (2004), que vem se desenvolvendo desde então (Figura 3A,B,D).

Nas análises de NDVI, é possível observar o mesmo padrão de aumento do índice, passando de 0.77 em 2016 para 0.82 em 2026, um aumento de 6,5% em 10 anos, representando uma área recuperada do ponto de vista espectral. O índice SWIR 2 (B12) também aponta uma redução de 6,4%, indicando um aumento na umidade do solo, o que pode também ter sido influenciado pela presença do lago na porção central da pedreira. A banda NIR (B08) teve um aumento expressivo, de 13,7%, indicando que a vegetação teve crescimento na área, mas também um aumento na complexidade da paisagem, com densidade foliar maior.

Na etapa de verificação em campo, é comprovado a presença de uma vegetação mais densa nas margens da pedreira e a vegetação aquática/de banhado na porção central, porém, assim como na pedreira Bela Vista, muitos dos indivíduos arbóreos, que dominam a paisagem são exóticas invasoras, como *Pinus* sp. e *Hovenia dulcis* (Fig. 3F-I), indicando que, embora a pedreira

apareça espectralmente como recuperada e com vegetação avançada, sem o controle no processo de regeneração natural, as espécies invasoras tomam o ambiente e dificultam a retomada da vegetação nativa.

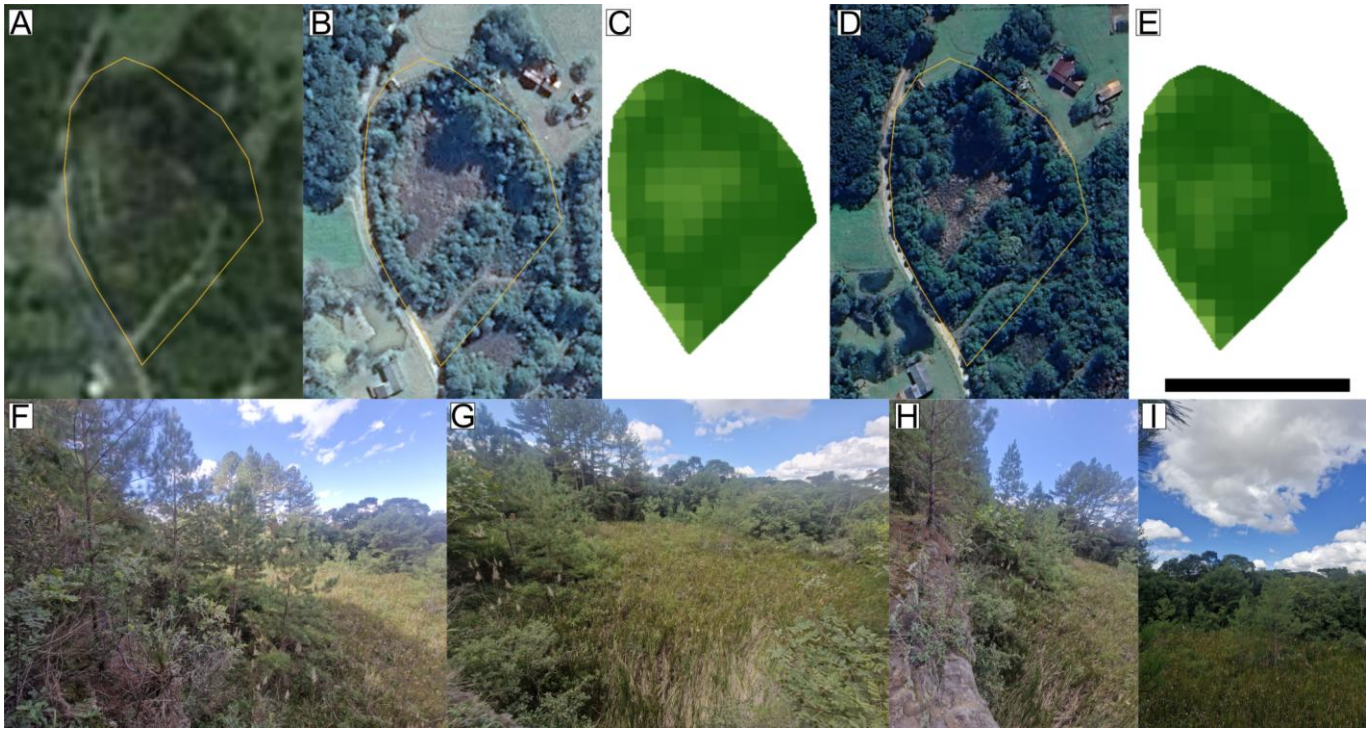


Figura 3. Evolução temporal e estado atual da Pedreira Rio Butiá. A. Imagem de satélite da área em 2004. B. Imagem de satélite de 2016. C. Mapa de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) de 20/04/2016, apresentando níveis moderados de biomassa (tons de verde médio). D. Imagem de satélite de 2025, revelando a densificação da cobertura vegetal e o avanço da floresta sobre a antiga cava. E. Mapa de NDVI de 29/03/2026, onde os tons de verde escuro homogêneo confirmam a recuperação ambiental e o alto vigor fotossintético. F, G, H e I. Registros fotográficos de campo (2026), demonstrando a diversidade estrutural da vegetação. A escala equivale a 100m. A,B,D, Google Earth; C,E. NDVI Sentinel 2.

Indicador	2016	2026	Variação
B04 (Vermelho)	0.0290	0.0262	-9,6%
B08 (NIR)	0.2308	0.2624	+13,7%
B12 (SWIR 2)	0.0776	0.0726	-6,4%
NDVI	0.77	0.82	+6,5%

Tabela 2. Índices da Pedreira Rio Butiá coletados através dos dados Sentinel 2, em 20/04/2016 e 29/03/2026.

A terceira pedreira avaliada está localizada na localidade de Vila Gren e dá nome a ela. Consiste em uma ocorrência de diamictitos maciço, e deve sua operação iniciada na década de 80, sendo finalizada em 2013 devido a problemas ambientais, que resultaram em um TAC (Termo de Ajuste de Conduta) para que a municipalidade executasse o plano de recuperação ambiental e fechamento da área. Esta pedreira encontra-se em fase final de recuperação, onde foi realizado o fechamento da lagoa formada pela exploração da base, a conformação do talude em duas bancadas, a recuperação de uma área lateral em APP que foi indevidamente utilizada como depósito de rejeitos, com o enriquecimento de espécies nativas arbóreas, sendo necessário ainda, para a finalização do processo de restauração, a conformação do topo da pedreira, transposição de núcleos de solo orgânico e plantio de espécimes nativas no topo, bancada intermediária e base da pedreira. Estes últimos processos estão programados para os próximos meses, devendo ser concluído até o final de 2026.

Esta pedreira apresenta formato em C, com 20m de altura total, dividida em dois taludes de 10m de altura cada, com uma bancada intermediária com largura média de 5m. O topo da pedreira foi inicialmente utilizado para acomodar o solo orgânico raspado das áreas em extração, e devido o longo tempo de deposição e ao rico banco de sementes, hoje é necessária a remoção de muitas árvores que cresceram nestas décadas de abandono, para a reconformação do topo da pedreira e utilização deste solo para implantar os núcleos de solo orgânico na bancada e na base da pedreira. Pelas imagens temporais de satélite é possível observar o desenvolvimento de vegetação arbórea no topo da pedreira (Fig. 4A,B,D), assim como o processo de reconformação do talude (FIG. 4D) e soterramento do lago. Com os dados espectrais é possível notar o aumento da área degradada, com a redução do NDVI de 0.69 em 2016 para 0.66 em 2026, redução essa causada pelo processo de reconformação do talude. Os valores de B04 (vermelho), saindo de um índice de 0.0350 em 2016 para 0.0463 em 2026 (aumento de 32,3%), e o índice SWIR 2 (B12), de 0.0705 em 2016 para 0.0913 em 2026 (aumento de 29,5%) indicam um aumento da área de solo exposta e um ressecamento da área, causados pela intervenção recente na pedreira (Fig. 4D).

Em análise de campo, é notável a recente intervenção mecânica na região, com grandes áreas de solo exposto, porém, ao contrário das demais pedreiras, houve um controle de espécies exóticas invasoras, com remoção de indivíduos de *Pinus* sp.. Como a pedreira se encontra em fase de recuperação ambiental, pelo órgão público, é esperado a diminuição dos índices de vegetação, mas que deverão ser seguidos de um aumento rápido na área vegetada, conforme o avançar do processo.

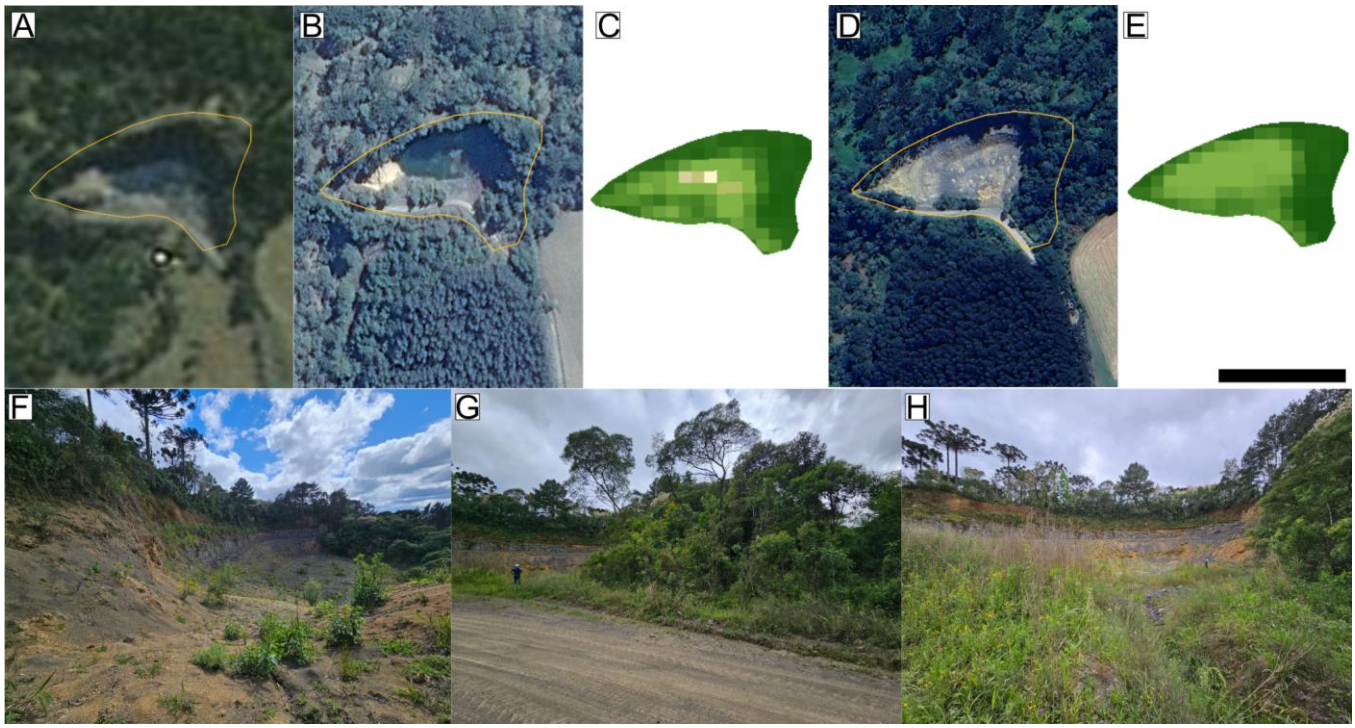


Figura 6. Evolução temporal e estado atual da Pedreira Vila Gren. A. Imagem de satélite da área em 2004. B. Imagem de satélite de 2016. C. Mapa de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) de 20/04/2016, com tons claros/marrons indicando baixo vigor vegetativo sobre a área de lavra. D. Imagem de satélite de 2023, revelando áreas de solo revolvido devido a intervenções recentes de manejo da prefeitura. E. Mapa de NDVI de 29/03/2026, onde os tons de verde ralo confirmam a redução temporária da biomassa herbácea existente em 2016, em resposta ao manejo mecânico ativo. F, G e H. Registros fotográficos de campo (2025), evidenciando o cenário de intervenção recente na pedreira. A escala equivale a 100m. A,B,D, Google Earth; C,E. NDVI Sentinel 2.

Indicador	2016	2026	Variação
B04 (Vermelho)	0.0350	0.0463	+32,3%
B08 (NIR)	0.1922	0.2262	+17,7%
B12 (SWIR 2)	0.0705	0.0913	+29,5%
NDVI	0.69	0.66	-4,3%

Tabela 3. Índices da Pedreira Vila Gren coletados através dos dados Sentinel 2, em 20/04/2016 e 29/03/2026.

A quarta pedreira, Vila Ruthes, teve sua operação iniciada também nos anos 80, intensificada entre 2004 a 2012, quando teve suas atividades paralisadas. Em conjunto com a paralisação, foi realizada uma recuperação ambiental de Áreas de Preservação Permanentes, às margens de um riacho, na margem leste da pedreira, com o enriquecimento de espécies arbóreas nativas. Essa pedreira tem formato alongado, e talude com altura variando de 5m até 20m, não apresenta bancadas intermediárias, e em determinados momentos ocorreu a extração mineral na sua base, o que resultou na formação de lagos e áreas alagáveis, que compõem a paisagem atual.

Pela observação temporal de imagens de satélite (Fig. 5 A,B,D) É possível notar o aumento na área de solo exposto de 2004 para 2016, em consonância com o período de explotação da área, e o início da cobertura vegetal de 2016 a 2025. Por imagens de satélite é claramente visível o domínio de gramíneas e vegetação rasteira em grande parte da pedreira, com poucas áreas com indivíduos de espécies arbóreas, isolados em alguns núcleos. Esse domínio de vegetação rasteira, recobrindo grande parte da pedreira, é comprovada pela visita de campo, sendo notável também a presença de espécimes de *Pinus* sp. que correspondem à maior parte do estrato arbóreo, com indivíduos se desenvolvendo até mesmo nas encostas do talude, com inclinação de quase 90º. A porção leste, recuperada pelo proprietário, apresenta um nível intermediário de restauração, com indivíduos com 10 a 15 m, e dominado por espécies nativas. Na área da pedreira um grande lago (>1.000 m^2) foi formado após o abandono, onde não ocorre nenhum tipo de vegetação ou espécies de fauna, em uma grande porção dos arredores do lago, é notável uma área alagável, que, embora seca na visita de campo, é dominada por espécies de áreas alagadiças, como *Coreopsis* cf. *tinctoria, Typha* sp. e espécies de Asteraceae e Cyperaceae.

Dados de NDVI da localidade indicam uma área degradada em 2016, com NDVI = 0.38 e B04 (vermelho) de 0.0803, indicando baixa área de vegetação e pouca absorção de luz visível, característico de áreas descobertas. Os dados de 2026 (NDVI=0.69 e B04 = 0.0418) indicam um desenvolvimento de uma cobertura vegetal e redução da área exposta, corroborada também pelo aumento de 27,5% no índice B08 (0.1784 para 0.2274). Os dados de SWIR 2 (B12) indicam também um aumento da umidade, deixando de ser um ambiente árido e descoberto para uma área orgânica e com retenção de umidade.

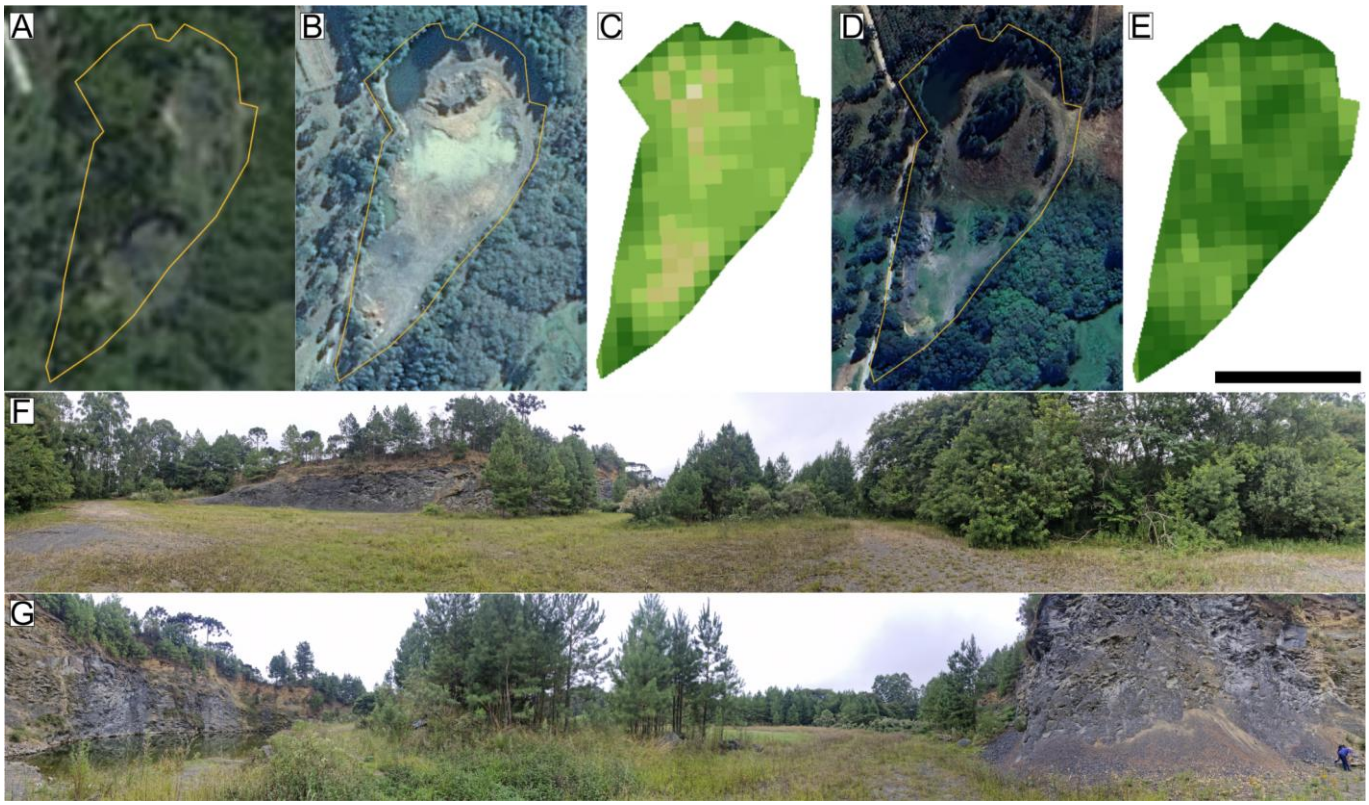


Figura 5. Evolução temporal e estado atual da Pedreira Vila Ruthes. A. Imagem de satélite da área em 2004, evidenciando o estágio inicial de intervenção. B. Imagem de satélite de 2016 demonstrando o substrato exposto durante o período de atividade. C. Mapa de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) de 20/04/2016, indicando baixo vigor vegetativo (tons claros/marrons). D. Imagem de satélite de 2025 apresentando o avanço da cobertura vegetal sobre a antiga frente de lavra. E. Mapa de NDVI de 29/03/2026, confirmando o aumento da densidade de biomassa e atividade fotossintética (tons verdes escuros). F e G. Registro fotográfico panorâmico da porção sul da pedreira, evidenciando a regeneração herbácea e arbustiva. G. Registros fotográficos panorâmicos de campo (2026), da porção sul (F) e norte (G) da pedreira. A escala equivale a 100m. A,B,D, Google Earth; C,E. NDVI Sentinel 2.

Indicador	2016	2026	Variação
B04 (Vermelho)	0.0803	0.0418	-47,9%
B08 (NIR)	0.1784	0.2274	+27,5%
B12 (SWIR 2)	0.1245	0.0924	-25,8%
NDVI	0.38	0.69	+81,6%

Tabela 4. Índices da Pedreira Vila Ruthes coletados através dos dados Sentinel 2, em 20/04/2016 e 29/03/2026.

Os índices espectrais de todas as pedreiras indicam um aumento da cobertura vegetal e uma recuperação ambiental passiva funcional, sendo esse aumento de vegetação proporcional ao tempo de abandono da área. As pedreiras Bela Vista e Rio Butiá, apresentam um índice NDVI acima de 0.80, indicando áreas com grande abundância de vegetação e com densidade foliar, a Vila Ruthes apresentou um aumento drástico do NDVI, +81,6% indicando que a recuperação ambiental promovida na pedreira pode ter ajudado para o rápido aumento da biomassa, porém, em conjunto com dados de campo, conseguimos verificar que o aumento no NDVI não necessariamente indica a qualidade da vegetação, nesse caso, onde a área é dominada por gramíneas e espécies invasoras. Enquanto as demais pedreiras tiveram uma melhora no índice NDVI, a Vila Gren apresenta uma redução do mesmo e um aumento das ondas SWIR 2, porém, correlato à etapa de preparação do solo para a restauração ambiental.

Contudo, é imperativo ressaltar que a recuperação quantitativa observada nos índices de vegetação (NDVI) não se traduz necessariamente em uma restauração qualitativa da biodiversidade original. Embora as pedreiras Bela Vista, Rio Butiá e Vila Ruthes apresentem uma cobertura vegetal densa e assinaturas espectrais de alto vigor, as observações in situ revelam um domínio

acentuado de espécies exóticas invasoras, com destaque para o *Pinus* spp. e a *Hovenia dulcis* (Uva-do-japão). Estas espécies, devido ao seu caráter pioneiro e alta adaptabilidade a solos degradados e de baixa fertilidade, colonizam rapidamente as frentes de lavra abandonadas, suprimindo o desenvolvimento da flora nativa local.

Este fenômeno cria um "falso positivo" na análise puramente espectral: o satélite registra um ecossistema produtivo e resiliente, mas, biologicamente, a área encontra-se em um estado de homogeneização biótica. A dominância de *Pinus*, observada claramente nas frentes de regeneração das pedreiras Rio Butiá e Vila Ruthes, altera o pH do solo e o ciclo de nutrientes, o que pode dificultar a transição para estágios sucessionais mais complexos da Mata Atlântica. Portanto, embora o Sentinel-2 confirme que as metas de cobertura de solo foram atingidas, a presença massiva dessas invasoras indica que o manejo futuro deve focar no controle de exóticas para que a recuperação funcional acompanhe a recuperação visual detectada orbitalmente.

Conclusão

O presente estudo demonstrou que o monitoramento multiespectral via satélite Sentinel-2 é uma ferramenta de elevada eficácia e baixo custo para a auditoria da recuperação ambiental em áreas de mineração desativadas. A análise dos marcos temporais entre 2016 e 2026 permitiu quantificar processos que, anteriormente, dependiam exclusivamente de vistorias técnicas *in situ*, oferecendo uma base de dados científica e auditável para a gestão territorial. As trajetórias de recuperação analisadas revelaram três cenários distintos:

Regeneração Natural Passiva (Bela Vista e Rio Butiá): Onde o tempo de abandono permitiu que a natureza restabelecesse índices de biomassa (NDVI > 0,80) comparáveis a ecossistemas nativos, comprovando a resiliência biológica em áreas de extração.

Regeneração Catalisada (Vila Ruthes): Onde o auxílio antrópico leve potencializou o vigor vegetativo, resultando no maior crescimento relativo observado no estudo (+81,6%).

Recuperação Ativa (Vila Gren): Onde a sensibilidade dos sensores orbitais foi capaz de detectar o retrocesso temporário dos índices de vegetação decorrente do manejo mecânico do solo, validando a eficácia do satélite em monitorar intervenções de engenharia ambiental em tempo real.

Entretanto, o "reverdecimento" detectado pelos sensores remotos deve ser interpretado com cautela sob a ótica da conservação biológica. Embora os índices espectrais confirmem a consolidação da cobertura vegetal e a estabilização do substrato rochoso, a validação de campo identificou uma dominância preocupante de espécies exóticas invasoras, como *Pinus* spp. e *Hovenia dulcis*. Esse cenário indica que, para uma restauração ecológica plena, o monitoramento orbital deve ser integrado a planos de manejo que priorizem a biodiversidade nativa, evitando que a recuperação visual mascare uma homogeneização biótica. Em suma, a integração entre o sensoriamento remoto e a verdade de campo constitui a abordagem ideal para o acompanhamento de Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD).

Agradecimentos

Agradecemos a Prefeitura de Mafra, pelos dados cedidos sobre as pedreiras do município, a Agência Espacial Europeia, pelo acesso aos dados da missão Sentinel 2 através do portal Copernicus Data Space Ecosystem.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). Instrução Normativa nº 11, de 11 de dezembro de 2014. Estabelece procedimentos para elaboração, análise, aprovação e acompanhamento da execução de Projeto de Recuperação de Área Degradada ou Perturbada – PRAD. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 241, p. 101, 12 dez. 2014.

MECHI, A.; SANCHES, D. L. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. Estudos Avançados, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010.

WEINSCHÜTZ, L. C.; CASTRO, J. C. A sequência Mafra superior / Rio do Sul inferior (Grupo Itararé, Permocarbonífero) em sondagens testemunhadas da região de Mafra (SC), margem leste da Bacia do Paraná. Geociências, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 131-141, 2005.

ANÁLISE DE PIPELINES DE APRENDIZADO DE MÁQUINA COM IMAGENS HIPERESPECTRAIS PARA DETECÇÃO DE METANO

Douglas Fabiã Martins, João Vitor Loch Martins, Beatriz Lima Santos Klienchen Dalari, Anita Maria da Rocha Fernandes, Douglas Rossi de Melo
Universidade do Vale do Itajaí - Escola Politécnica
e-mail: {jo4ovlm, douglasmartins}@edu.univali.br, {beatriz.dalari, anita.fernandes, drm}@univali.br
Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Imagens Hiperespectrais; Gás Metano

Resumo

Dos gases de efeito estufa (GEE), que são originados de ações humanas interferindo no meio ambiente, o metano (CH4) é um dos mais relevantes, sendo um compromisso global a diminuição da sua emissão. Porém, os dados da Agência Nacional de Petróleo (ANP) mencionam um crescimento nessa emissão, no contexto do Brasil, de 2021 até 2024. O sensoriamento remoto utilizando imagens hiperespectrais permite detectar essas emissões e mitigar seus danos, através de pipelines de Machine Learning (ML). A maioria desses pipelines atuais operam majoritariamente em estações na Terra, onde encontramos um gargalo na largura de banda e a latência de dias, até que a imagem possa ser processada, o que torna essa abordagem incompatível com este problema ambiental. Processar os modelos diretamente a bordo do satélite reduz o volume de dados transmitidos e habilita alertas de baixa latência, porém o modelo utilizado deve ser mais compacto e operar sob restrições severas de energia e memória. Diante desse cenário, este trabalho apresenta uma revisão estruturada de 12 publicações, entre 2024 e 2026, sobre pipelines de ML hiperespectral para detecção de CH4, com ênfase em compressão de modelos e processamento embarcado de baixo consumo, articulando o estado da arte ao perfil de emissores brasileiros.

Introdução

O metano (CH_4) é o segundo gás de efeito estufa (GEE) de origem antropogênica mais relevante em termos de forçamento radiativo, sendo responsável por aproximadamente 30% do aquecimento global observado desde o período pré-industrial (Tiemann *et al.*, 2024). Aproximadamente 60% das emissões globais de CH4 são de origem antrópica, distribuídas entre os setores de resíduos (19%), agricultura (44%) e energia (37%). (Batchu *et al.*, 2026). Devido ao seu elevado potencial de aquecimento global, cerca de 86 vezes superior ao do CO_2 em um horizonte de 20 anos, e ao seu tempo de residência atmosférica relativamente curto (≈ 9 anos), o CH_4 é considerado um dos alvos mais custo-efetivos para a mitigação climática em escala de décadas (Tiemann *et al.*, 2024). No setorde petróleo e gás, eventos episódicos de ultraemissão, associados a falhas operacionais, contribuem de forma desproporcional para o total de emissões, reforçando a urgência de seu monitoramento. Nesse contexto, 125 países firmaram o Compromisso Global do Metano durante a COP26, comprometendo-se a reduzir as emissões antropogênicas de CH_4 em 30% até 2030 em relação à linha de base de 2020 (Batchu *et al.*, 2026).

O Brasil, como signatário do Compromisso Global do Metano e sede da COP30 (Tavella, 2025), enfrenta desa- fios para conciliar a expansão de sua produção de hidrocarbonetos com as metas climáticas assumidas. Em 2024, as emissões do setor atingiram 22,15 $MtCO_2eq$, representando um crescimento de 25% em relação a 2021 (Agência Nacional do Petróleo, 2026). No mesmo período, a participação de CH_4 e N_2O nas emissões totais aumentou de 6,5% para 8,1%, indicando uma elevação da intensidade relativa desses gases. No segmento *offshore*, as emissões de CH_4 cresceram cerca de 27% entre 2022 e 2024, superando o crescimento da produção (≈ 10%), com destaque para as bacias de Campos e Santos, responsáveis por 57,3% e 39,7% das emissões, respectivamente. No ambiente *onshore*, as bacias de Recôncavo (47,68%) e Potiguard (24,93%) concentram as principais fontes, incluindo operadores com intensidade de emissão superior à média setorial (Agência Nacional do Petróleo, 2026).

Além do setor de óleo e gás, o país apresenta fontes difusas relevantes, como a rizicultura irrigada em Santa Ca- tarina (SC) e os aterros sanitários metropolitanos, que demandam abordagens específicas de monitoramento devido à natureza distribuída das emissões (Epagri, 2025). Esse cenário evidencia a necessidade de tecnologias capazes de monitorar emissões de forma contínua, escalável e espacialmente resolvida, contribuindo para a verificação independente de inventários e para o suporte às políticas ambientais.

Nesse contexto, a detecção de plumas de CH_4 por sensoriamento remoto hiperespectral tem se consolidado como uma abordagem promissora. As informações hiperespectrais são capturadas por sensores a bordo de *Un- manned Aerial Vehicles* (UAVs) ou satélites de observação da Terra; exemplos incluem o EMIT (*Earth Surface Mineral Dust Source Investigation*), PRISMA, EnMAP e Tanager-1, que operam em faixas do infravermelho de ondas curtas (SWIR), com bandas de absorção relevantes de CH_4, especialmente em torno de 1600 nm e 2200– 2400/2500 nm. A detectabilidade depende de sensor, albedo, vento, geometria de aquisição e intensidade da fonte; por isso, limites como 50 a 300 kg h^{-1} devem ser interpretados como definições funcionais ou limiares específicas da literatura para cada sensor e condição, e não como uma capacidade universal de todos os sensores orbitais (Tiemann *et al.*, 2024). Modelos de aprendizado profundo (*deep learning*, DL), incluindo arquiteturas baseadas em U-Net (Chen *et al.*, 2025), *Vision Transformers* (ViT) (Ruˇzicˇka; Markham, 2025), filtros casados aprendíveis (Albert de Araújo; Zortea, 2025) e redes convolucionais especializadas (Marjani *et al.*, 2024), têm de monstrado desempenho competitivo em relação às abordagens tradicionais de processamento espectral, ampliando a viabilidade técnica do monitoramento de fontes pontuais em larga escala (Tiemann *et al.*, 2024).

Apesar desses avanços, os *pipelines* atuais de *Machine Learning* (ML) hiperespectral majoritariamente de processamento em estações terrenas, o que impõe dois gargalos críticos: (i) a largura de banda de *downlink*, insu- ficiente para transmitir cubos hiperespectrais brutos com a frequência necessária para alertas em tempo quase real; e (ii) a latência entre a aquisição da imagem e a geração do alerta, frequentemente de vários dias, incompatível com a resposta operacional exigida em cenários de super-emissão aguda (Herec; Ruˇzicˇka; Pitonˇák, 2025). A im- plantação de modelos de detecção diretamente a bordo do satélite (*on-board processing*) representa um caminho para reduzir ambos, ao diminuir o volume de dados transmitidos à Terra e ao habilitar alertas de baixa latência. Contudo, as restrições de recursos computacionais, de consumo de energia e de área de silício de processadores es- paciais qualificados impõem requisitos severos de compressão e otimização de modelos (Ruˇzicˇka; Markham, 2025; Herec; Ruˇzicˇka; Pitonˇák, 2025). Técnicas como *quantization-aware training* (QAT), poda estrutural (*pruning*) e fluxos de síntese para aceleradores embarcados, incluindo *Field-Programmable Gate Array* (FPGA), têm emergido como caminhos promissores para inferência em *hardware* restrito, mas ainda carecem de validação comparativa no domínio específico da detecção de metano (Herec; Ruˇzicˇka; Pitonˇák, 2025).

Diante desse cenário, este trabalho apresenta uma revisão estruturada da literatura sobre *pipelines* de apren- dizado de máquina hiperespectral aplicáveis à detecção de CH_4, com ênfase em abordagens de compressão de modelos e de processamento embarcado de baixo consumo.

Material e Métodos

Nesta pesquisa realizou-se uma revisão estruturada da literatura, de natureza qualitativa e exploratória. As bus- cas foram conduzidas entre março de 2025 e abril de 2026 nas bases arXiv (subáreas cs.LG, eess.IV, physics.ao-ph e astro-ph.IM), IEEE Xplore (periódicos TGRS, JSTARS, IGARSS e GRSL), ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Nature, Scientific Reports, Remote Sensing of Environment, Zenodo, ESA Open Science e NASA Earthdata, com o Google Scholar utilizado apenas como ferramenta de descoberta. Foram empregadas palavras-chave organizadas em cinco clusters temáticos: (i) detecção de metano e GEE por sensoriamento remoto hiperespectral; (ii) arquiteturas de DL para segmentação semântica hiperespectral; (iii) compressão, quantização e *pruning* de modelos de segmentação; (iv) inferência embarcada em FPGA e *hardware* espacial; e (v) ameaças de novidade concorrentes, incluindo computação neuromórfica para detecção de metano.

Foram incluídos artigos revisados por pares, preprints e relatórios técnicos que abordassem pelo menos um dos cinco eixos, com metodologia clara de pré-processamento, modelagem ou síntese em *hardware*; preprints foram mantidos quando apresentavam contribuição técnica diretamente relacionada ao metano, a dados hiperespectrais ou ao processamento embarcado. Foram excluídos estudos sem foco em metano, em segmentação hiperespectral, em inferência eficiente ou em aplicação orbital, bem como registros redundantes em relação a bases de dados ou métodos já representados por estudos selecionados. Trabalhos consolidados foram mantidos quando serviam como referência direta para comparação de arquitetura, sensor ou viabilidade embarcada. Os 12 trabalhos incluídos são detalhados na Tabela 1 segundo a taxonomia proposta a seguir.

A diversidade de abordagens identificadas na revisão revela que não existe uma única dimensão capaz de caracterizar adequadamente um *pipeline* de detecção hiperespectral de metano. A escolha do sensor condiciona a resolução espectral e a taxa de revisita; o alvo de detecção determina se o problema é de segmentação pontual ou de mapeamento difuso; a arquitetura de rede define o compromisso entre capacidade representacional e custo computacional; e a estratégia de *hardware* estabelece se o modelo é operacionalizável em órbita ou restrito à inferência terrena (Ruˇzicˇka; Markham, 2025). Ignorar qualquer um desses eixos implica comparações enviesadas que impedem a identificação de modelos ajustados a um único critério. Para superar essa limitação, propõe-se uma taxonomia em quatro eixos, ilustrada na Figura 1.

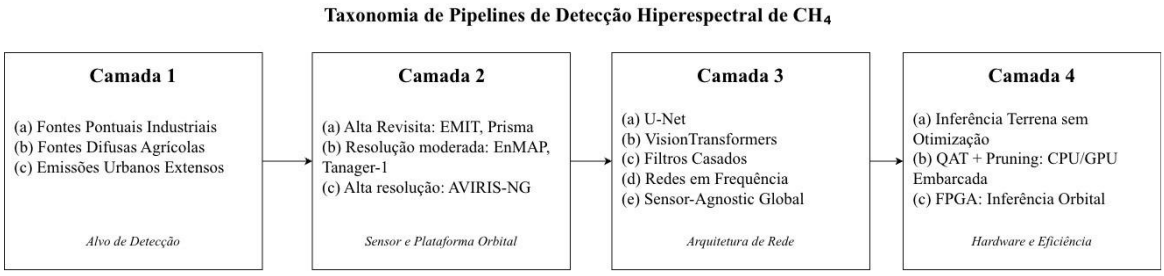


Figura 1: Fluxograma da taxonomia de detecção hiperespectral de CH4.

Para tornar a análise internamente consistente, foi adotado um protocolo de extração de dados que mapeia cada *pipeline*, ilustrado na Figura 2.

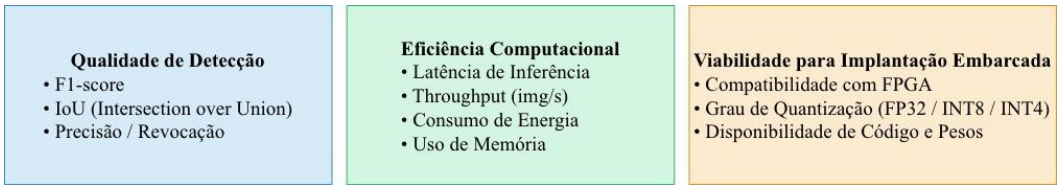


Figura 2: Três dimensões comparativas de desempenho entre os trabalhos selecionados.

Resultados e Discussão

Os resultados evidenciam uma convergência arquitetural em torno de variantes de U-Net e ViT espectrais, predominantemente aplicados a bandas SWIR, relevantes para detecção de CH_4. A Tabela 1 sintetiza os doze trabalhos selecionados segundo os quatro eixos taxonômicos propostos no Material e Métodos. Esse cenário confirma a limitação sistematicamente apontada em revisões do domínio (Tiemann *et al.*, 2024): a ausência de um *benchmark* unificado impede a comparação direta entre métricas e tende a favorecer artificialmente modelos otimizados para um único critério de desempenho.

Na dimensão de qualidade de detecção, os modelos com maiores métricas operam sobre dados hiperespec- trais de pleno espectro. O PRISMethaNet (Marjani *et al.*, 2024), único trabalho com foco exclusivo em aterros sanitários, registrou o desempenho mais elevado no conjunto de teste (F1=0,9412; OA=0,9961) mediante *Convo- lutional Neural Networks* (CNN) com módulo *Atrous Spatial Pyramid Pooling* (ASPP), treinado sobre o dataset PRISMA: resultado que reflete o contexto de classificação binária com forte contraste espectral e não é direta- mente comparável às abordagens de segmentação em fontes pontuais industriais. Entre estas, o MPSUNet (Chen *et al.*, 2025) alcançou mIoU=78,20% sobre EMIT com latência de 46,61 ms, integrando um módulo de atenção piramidal (PSA) que expande o campo receptivo sem custo proporcional em parâmetros (24,89 M; 226 G FLOPs). O AttMetNet (Ahsan *et al.*, 2025) obteve F1=0,85 sobre Sentinel-2 ao incorporar o índice NDMI como canal adi- cional, mostrando que a injeção de conhecimento espectral *a priori* compensa parcialmente a perda de resolução em sensores multiespectrais.

Uma distinção metodológica de impacto direto nas métricas emerge da comparação entre abordagens *enhancement-based* e *radiance-based* (Yang *et al.*, 2026): modelos alimentados pelo produto do filtro casado (F1=0,78; IoU=0,64) superam consistentemente os treinados sobre radiância bruta (F1=0,66; IoU=0,49) nos mesmos dados EMIT, evi- denciando que o pré-processamento espectral clássico encapsula informação discriminativa que arquiteturas de ponta não recuperam integralmente a partir da radiância bruta. A FSDINet (Liu *et al.*, 2025), ao explorar a trans- formada de Fourier para injeção de *features* no domínio de frequência, atingiu F1=77,05% no dataset AVIRIS-NG

com apenas 6,3 G FLOPs (∼36× menos que o MPSUNet), Ao ser aplicada ao WorldView-3, o F1 caiu para 27,81%, relevando que poucos canais espectrais comprometem a generalização do modelo. O filtro casado com

assinatura aprendível (Albert de Araújo; Zortea, 2025) registrou ganho de 18% em F1 em relação à linha de base sem otimização conjunta (F1=0,65 vs. 0,55 no U-Net), indicando que a parametrização da assinatura-alvo produz um efeito mais pronunciado do que as alterações isoladas na arquitetura do decodificador.

Na dimensão de eficiência computacional, o extremo de maior acurácia é ocupado pelo MAPL-EMIT (Batchu *et al.*, 2026) (*Methane Analysis and Plume Localization with EMIT*, conforme denominação adotada pelos autores), treinado em ∼72 h em 32 chips TPU com 3,6 milhões de plumas sintéticas geradas por modelo físico Lagrangiano, escala irreprodutível em *hardware* embarcado. O *framework* de duplo caminho (Yang *et al.*, 2026) apresentou a menor pegada paramétrica entre os modelos de segmentação (1,82 M parâmetros no CNN-ASPP), com latência de

1,4 ms por *patch*, posicionando-se como candidato natural à compressão embarcada, sem reformulação arquitetural significativa. A FSDINet (Liu *et al.*, 2025), com 8,4 M parâmetros e 6,3 G FLOPs, reforça que a injeção no domínio de frequência pode operar com custos computacionais consideravelmente menores do que os de arquiteturas de atenção piramidal, desde que o sensor-alvo possua resolução espectral suficiente.

A terceira dimensão, a viabilidade de implantação embarcada, é simultaneamente a mais crítica e a menos desenvolvida no conjunto revisado. Os HyperspectralViTs (Ru˚zic˘ka; Markham, 2025) introduziram adaptações

de camadas espectrais 1×1 e *upscaling* que eliminam o gargalo informacional imposto pelo alto número de ban- das, atingindo 0,64 s por granule EMIT no Jetson AGX Xavier (∼317× mais rápido do que a linha de base HyperSTARCOP de 203,3 s no mesmo *hardware*; 47× mais rápido do que a execução do mesmo modelo em CPU, no Unibap ION-SCV004). Herec et al. (2025) demonstraram que o Mag1c-SAS, variante acelerada que estima parâmetros em apenas 1% dos dados e reutiliza o filtro no restante, alcança ∼100× de aceleração sobre o Mag1c original (1,15 s vs. 109,61 s no Raspberry Pi 3B+, proxy do ION-SCV004); combinado ao LinkNet, resultou no melhor compromisso do conjunto para *hardware* restrito, com F1=44,43±3,9% (todos os pixels) e F1-Strong=60,37±5,1% (plumas fortes), *pipeline* completo em 1,58 s. No domínio do aprendizado de máquina clássico, Wijata et al. (Wijata; Longépé; Nalepa, 2025) mostraram que um *pipeline* de *superpixels* SLIC com RUS-

Boost (F1=0,803; SEN=0,864) dispensa processamento *pixel* a *pixel* e é potencialmente compatível com *hardware* já implantado em órbita. A abordagem de aprendizado quântico de Miroszewski et al. (Miroszewski; Nalepa; Wijata, 2025), pioneira na aplicação de *light-cone feature selection* a HSI de CH_4, não produziu ganhos estatis- ticamente significativos em relação a *Support Vector Machines* (SVMs) clássicas com apenas 30 observações de treino, configurando-se como uma prova de conceito ainda restrita à simulação clássica.

A lacuna central permanece clara: modelos de alta acurácia exigem GPUs de alto desempenho, enquanto as abordagens embarcadas ainda ficam aquém em termos de qualidade de detecção. Fluxos de quantização, poda e síntese para aceleradores embarcados buscam ocupar esse espaço, mas ainda exigem validação específica com dados orbitais de metano (Herec; Ru˚zic˘ka; Piton˘ák, 2025; Ru˚zic˘ka; Markham, 2025).

As metodologias revisadas apontam oportunidades e lacunas nos três cenários de emissores brasileiros deline- ados na Introdução. No segmento *offshore*, as bacias de Campos e Santos concentram a maior parte das emissões de CH_4 no mar, o que as torna prioritárias para avaliação por sensores orbitais. As arquiteturas treinadas sobre EMIT são candidatas relevantes para esse contexto: o MAPL-EMIT (Batchu *et al.*, 2026) localiza fontes pon- tuais com erro mediano de 101 m (1,7 pixels), compatível com a escala de plataformas marítimas nas bacias de Campos e Santos, enquanto o MPSUNet (Chen *et al.*, 2025) adiciona

validação cruzada em Sentinel-2 de acesso gratuito e cobertura contínua. Em paralelo, no segmento terrestre, operadores com alta intensidade de GEE, como Petro-Victory e Brasil Refinarias, representam candidatos a estudos de validação local quando houver geometria de pluma e cobertura orbital compatíveis (Agência Nacional do Petróleo, 2026).

Referência	Alvo de Emissão	Sensor e Plataforma	Arquitetura e Abordagem	Qualidade de Detecção	Eficiência Computacional	Viabilidade Embarcada
(CHEN et al., 2025)	Pontual industrial e urbano (óleo, gás, aterros)	EMIT; Sentinel-2	U-Net + PSA (*Pyramid Squeeze Attention*); encoder VGG16; *loss* Dice+Focal	mIoU=78,20%; Precisão=80,78%; Recall=71,11%; latência=46,61 ms	226 G FLOPs; 24,89 M parâm.; 21,45 FPS	GPU terrena (RTX 2080Ti); sem avaliação embarcada
(ARAÚJO; ZORTEA, 2025)	Pontual industrial	EMIT (SWIR 2122–2488 nm; 50 bandas)	U-Net e SegFormer com filtro casado de assinatura aprendível (LMF)	F1=0,65 (U-Net); AUPRC=0,71; Precisão=0,69; Recall=0,62	Treino: 4–5 h (A100 GPU); +18% F1 s/ MF clássico	GPU terrena; sem avaliação de latência
(BATCHU et al., 2026)	Pontual industrial (global)	EMIT (L1B; 285 bandas; 2137–2493 nm)	U-Net com encoder Swin-v2-S (~30 M parâm.); 3,6 M plumas sintéticas via puff Lagrangiano	Recall=79% plumas reais; Precisão=0,74–0,99; Erro localiz.=101 m (1,7 px)	Treino: ~72 h em 32 chips TPU; inferência via Earth Engine	Escala global; inferência terrena
(YANG et al., 2026)	Pontual industrial (global; agnóstico a sensor)	EMIT; Tanager-1 (1 banda ENH — saída Mag1c — ou 49 bandas RAD, 2137–2493 nm)	CNN-ASPP, Inception U-Net e SegFormer em dois caminhos: *enhancement* (ENH) e radiância bruta (RAD)	F1=0,78; IoU=0,64; Precisão=0,82; Recall=0,75 (CNN-ASPP/ENH); F1=0,66 (RAD)	1,817 M parâm.; 1,4 ms/*patch* (CNN-ASPP)	Candidato on-board (modelo leve); validado somente em GPU
(LIU et al., 2025)	Pontual industrial	AVIRIS-NG; WorldView-3; EMIT	FSDINet: módulos espectral (SEM), frequência (FDM) e espaço (SDM) via transformada de Fourier	F1=77,05%; IoU=65,56% (AVIRIS-NG); F1=27,81% (WorldView-3)	6,3 G FLOPs; 8,4 M parâm. (RTX 4090)	GPU terrena; queda severa em sensor multiespectral
(AHSAN et al., 2025)	Pontual industrial e urbano (óleo, gás, aterros)	Sentinel-2 multispectral (13 canais: 12 bandas originais + NDMI concatenado)	U-Net com *Attention Gates*; NDMI como canal adicional; *Focal Loss*	F1=0,85; mIoU=0,66; Precisão=0,83; Recall=0,86; BA=0,88	NR	NR; Sentinel-2 gratuito e cobertura global
(TIEMANN et al., 2024)	Múltiplos (revisão)	TROPOMI; EMIT; PRISMA; Sentinel-2 et al.	Revisão sistemática: MF, CNN, U-Net, SegFormer, ViT	–	–	Identifica lacuna sistêmica: ausência de *benchmark* unificado e de soluções embarcadas
(RUŽIČKA; MARKHAM, 2025)	Pontual industrial; identificação mineral	EMIT (86 bandas; 1573–2478 nm)	HyperSegFormer / HyperEfficientViT: *Spectral Layer* 1×1, *upscaling* e ConvUpStride	F1=74,27±2,9% (sintético); F1=60,75±3,7% (STARCOP); +27% sobre baseline	4,326 M parâm.; 30,1 s/granule (Unibap CPU); 0,64 s (Jetson Xavier GPU)	Testado em Unibap ION-SCV004 (CPU, 30,1 s) e Jetson Xavier (GPU, 0,64 s); ~317× mais rápido que HyperSTARCOP no Jetson Xavier
(MARJANI et al., 2024)	Emissor urbano extenso (aterros sanitários; 17 aterros/localizações)	PRISMA (VNIR+SWIR, 400–2500 nm; 54 bandas SWIR selecionadas; 30 m)	CNN-ASPP (dilatações 3, 6, 12, 18); *Tversky Index loss*; Grad-CAM para interpretabilidade	F1=0,9412; OA=0,9961; Precisão=0,8923; Recall=0,9903 (conjunto de teste)	Treino: 118 s; MSE quantif.=1.102 kg/h vs. 1.974 kg/h (método estatístico)	GPU terrena; transferência ao EMIT avaliada de forma exploratória; inclui São Paulo (Q médio=1.880 kg/h)
(WIJATA et al., 2025)	Pontual industrial	AVIRIS-NG/STARCOP (8 bandas selecionadas)	Superpixels SLIC + *features* espectrais + ML clássico (RUSBoost, AdaBoost, SVM); sem DL pesado	Melhor F1=0,803 e SEN=0,864 (RUSBoost+mag1c); melhor ACC=0,798 e MCC=0,599 (AdaBoost+mag1c)	Sem DL; superpixels eliminam processamento pixel a pixel	Potencialmente on-board; abordagem equivalente a classes de modelos já embarcadas no Intuition-1 (KP Labs)
(MIROSZEWSKI et al., 2025)	Pontual industrial	AVIRIS-NG/STARCOP (8 bandas)	QML: *light-cone feature selection* (circuito quântico) + SVM linear, RBF e kernel quântico	F1 máximo=0,668 (SVM_{RBF} sem mag1c); SVMQ com mag1c alcança MCC até 0,237 em configuração restrita; sem evidência de vantagem robusta do kernel quântico	30 observações de treino (limite quântico); simulação clássica de circuito	Prova de conceito; sem *deployment* on-board
(HEREC et al., 2025)	Pontual industrial (plumas fortes)	AVIRIS-NG/STARCOP (125 bandas; 1573–	LinkNet (MobileNet-v3-small; 0,851 M parâm.) + Mag1c-SAS ou CEM como pro-	F1=44,43±3,9% (todos); F1-Strong=60,37±5,1% (LinkNet+Mag1c-SAS)	Mag1c-SAS: ~100× mais rápido que Mag1c (1,15 s vs. 109,61 s); pipeline: 1,58 s	Hardware real: Raspberry Pi 3B+ (proxy ION-SCV004); FPGA via DaCe sinalizado

Tabela 1: Síntese dos *pipelines* de aprendizado de máquina hiperespectral para detecção de CH_4 segundo a taxonomia proposta

Na rizicultura irrigada em SC (Epagri, 2025), o caráter difuso das emissões metanogênicas em solos alagados permanece uma lacuna metodológica: nenhum dos trabalhos revisados foi treinado nem validado para esse tipo de fonte. Abordagens por *superpixels* (Wijata; Longépé; Nalepa, 2025) ou filtros espectrais leves (Herec; Ruˇzicˇka; Pitonˇák, 2025) podem ser

investigadas em estudos futuros, mas sua aplicabilidade depende de dados de campo, de máscaras de referência e de uma avaliação explícita da separabilidade espectral.

Nos aterros sanitários metropolitanos, o PRISMethaNet (Marjani *et al.*, 2024) é o único trabalho do conjunto desenvolvido especificamente para esse tipo de emissor urbano extenso, com validação em 17 aterros/localizações em diferentes países, incluindo São Paulo (Q médio=1.880 kg/h), e com aplicabilidade potencial via PRISMA ou EMIT, mediante adequação espectral entre os sensores (Marjani *et al.*, 2024). Esse conjunto reforça o potencial de monitoramento independente de CH_4 necessário para a verificação dos compromissos assumidos pelo Brasil no âmbito do Compromisso Global do Metano e da COP30 (Tavella, 2025; Agência Nacional do Petróleo, 2026).

No extremo da escala global, o MAPL-EMIT (Batchu *et al.*, 2026) demonstrou que a geração massiva de plumas sintéticas via modelo físico Lagrangiano viabiliza *recall* de 79% em fontes reais com erro de localização mediano de 101 m, enquanto o PRISMethaNet (Marjani *et al.*, 2024) sugere a transferibilidade do paradigma a emissores urbanos extensos com validação em diferentes regiões. Em conjunto, esses resultados estabelecem referências técnicas relevantes, mas ainda não substituem as validações locais no território brasileiro.

Considerações Finais

A revisão conduzida neste trabalho evidencia que a combinação de imagens hieprespectrais orbitais na faixa SWIR com arquiteturas de DL alcançou resultados com maturidade técnica suficiente para o monitoramento au- tomatizado de plumas de CH_4 em fontes pontuais industriais. Variantes de U-Net e ViT espectrais consolidam as famílias arquiteturais predominantes, com desempenho que varia de moderado a elevado conforme o tipo de emisor; mesmo as mais recentes não recuperam integralmente a partir dos dados brutos.

Essa maturidade, contudo, é parcial. A heterogeneidade de sensores, conjuntos de dados e protocolos de ava- liação, confirmada ao longo desta revisão, impede comparações diretas e tende a inflar as métricas de abordagens ajustadas a um único cenário. Somado a isso, há a fragilidade intersensor: modelos treinados em dados hiperes- pectrais densos sofrem uma degradação expressiva ao serem transferidos para instrumentos com menor número de bandas, um problema que a literatura reconhece, mas ainda não resolve. No eixo computacional, a tensão entre acurácia e viabilidade embarcada permanece o gargalo central: modelos de alta acurácia exigem infraestrutura de larga escala, enquanto processadores espaciais qualificados impõem restrições severas de energia, silício e memó- ria que tornam a inferência em órbita um desafio complexo. A essas limitações, podemos acrescentar uma lacuna temática: nenhum dos trabalhos revisados aborda fontes difusas como arrozais inundados ou pastagens, o que é diretamente relevante para o perfil de emissões brasileiro.

Os caminhos de superação descritos na literatura convergem em quantização, poda estrutural e síntese para aceleradores embarcados de baixo consumo. Resultados preliminares com arquiteturas leves e variantes acelera- das de pré-processamento indicam que a inferência de baixa latência em *hardware* restrito é tecnicamente viável, ainda que a demonstração em dispositivos espaciais qualificados dependa de validação com dados orbitais reais. Arquiteturas agnósticas a sensores e conjuntos de dados sintéticos fisicamente fundamentados tendem a atenuar, por vias complementares, os problemas de transferibilidade e de escassez de anotações. Diante do crescimento recente das emissões nacionais de GEE no setor de óleo e gás, com destaque para o segmento marítimo, a cons- trução de capacidade nacional de monitoramento independente, abrangendo o pré-sal, os aterros metropolitanos e os sistemas agrícolas de emissão difusa, é um requisito, não uma oportunidade, para verificar os compromissos climáticos assumidos pelo Brasil.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado, em parte, pela Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina - FAPESC (contrato 2024TR001897) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecno- lógico - CNPq.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, Gás Natural e Biocombustíveis. **Painel Dinâmico - Emissões de Gases do Efeito Estufa**. [*S. l.: s. n.*], 2026. Dashboard do Power BI. Dados consultados/exportados do dashboard em 23 abr. 2026. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMTk0MDFkYTctOTVkZC00YTY5LTkyNzYtNTIyY2I0OTM2YzUyIiwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTI0YTYtNGI0Mi1iN2VmLTEyNGFmY2FkYzkxMyJ9.

AHSAN, Rakib *et al.* **AttMetNet: Attention-Enhanced Deep Neural Network for Methane Plume Detection in Sentinel-2 Satellite Imagery**. [*S. l.: s. n.*], 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2512.02751. arXiv: 2512.02751 [cs.CV]. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2512.02751.

ALBERT DE ARAÚJO, Ronald; ZORTEA, Maciel. Learnable Matched Filter for Methane Plume Segmentation in Hyperspectral Imagery. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 22, p. 1–5, 2025. DOI: 10.1109/LGRS.2025.3527871.

BATCHU, Vishal V. *et al.* **Global monitoring of methane point sources using deep learning on hyperspectral radiance measurements from EMIT**. [*S. l.: s. n.*], 2026. DOI: doi.org/10.48550/arXiv.2604.10094. arXiv: 2604.10094 [cs.CV]. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2604.10094.

CHEN, Cheng *et al.* MPSUNet: A Deep Learning-Based Segmentation Framework for Methane Plume Detection With Space-Based Hyperspectral and Multispectral Imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 63, p. 1–15, 2025. DOI: 10.1109/TGRS.2025.3563599.

EPAGRI. **Políticas públicas impulsionam a produção sustentável de arroz em Santa Catarina**. [*S. l.: s. n.*], 2025. Acesso em: 10 dez. 2025. Disponível em: https://www.epagri.sc.gov.br/politicas-publicas- impulsionam-a-producao-sustentavel-de-arroz-em-santa-catarina/.

HEREC, Jonáš; RU˚ŽIC˘KA, Vít; PITON˘ÁK, Rado. **Optimizing Methane Detection On Board Satellites: Speed, Accuracy, and Low-Power Solutions for Resource-Constrained Hardware**. [*S. l.: s. n.*], 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2507.01472. arXiv: 2507.01472 [cs.CV]. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2507.01472.

LIU, Yuquan *et al.* Frequency and Spatial Domain Injection Network for Methane Plumes Semantic Segmentation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 63, p. 1–15, 2025. DOI: 10.1109/TGRS.2024.3523022.

MARJANI, Mohammad *et al.* PRISMethaNet: A novel deep learning model for landfill methane detection using PRISMA satellite data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 218, p. 802–818, 2024. ISSN 0924-2716. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.10.003. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271624003800.

MIROSZEWSKI, Artur; NALEPA, Jakub; WIJATA, Agata M. Light-Cone Feature Selection in Methane Hyperspectral Images. *In:* IGARSS 2025 - 2025 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. [*S. l.: s. n.*], 2025. p. 2640–2644. DOI: 10.1109/IGARSS55030.2025.11243470.

RU˚ŽIC˘KA, Vít; MARKHAM, Andrew. HyperspectralViTs: General Hyperspectral Models for On-Board Remote Sensing. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 18,

p. 10241–10253, 2025. DOI: 10.1109/JSTARS.2025.3557527.

TAVELLA, Marcone. **COP 30: Santa Catarina melhora gestão, mas Florianópolis patina nas políticas climáticas**. [*S. l.: s. n.*], nov. 2025. Disponível em: https://www.gazetadopovo.com.br/santa- catarina/cop-30-santa-catarina-sc-florianopolis-politicas-climaticas/. Acesso em: 10 dez. 2025.

TIEMANN, Enno *et al.* **Machine Learning for Methane Detection and Quantification from Space - A survey**. [*S. l.: s. n.*], 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2408.15122. arXiv: 2408.15122 [cs.CV]. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2408.15122.

WIJATA, Agata M.; LONGÉPÉ, Nicolas; NALEPA, Jakub. Tracking the Invisible Enemy: Methane Detection Using Machine Learning Methods. *In:* IGARSS 2025 - 2025 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. [*S. l.: s. n.*], 2025. p. 1233–1237. DOI: 10.1109/IGARSS55030.2025.11242425.

YANG, Seyoung *et al.* Beyond localized methane plume detection: a dual-path deep learning framework for sensor-agnostic global hyperspectral methane plume monitoring. **npj Climate and Atmospheric Science**, mar. 2026. ISSN 2397-3722. DOI: 10.1038/s41612-026-01387-8. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41612-026-01387-8.

GEO+IA PARA ANÁLISE DE DINÂMICA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E SUA RELAÇÃO COM ONDAS DE CALOR

1 João Felipe Freitag, 2 Lucas Kovaleski, 3 Cleomar Reginatto
1, 2 e 3 Universidade de Passo Fundo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
E-mail: 1 158662@upf.br; 2 158666@upf.br; 3 cleomar@upf.br

Palavras-chave: temperatura de superfície terrestre (LST); índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI); mudanças climáticas.

Resumo

O município de Passo Fundo destaca-se pelo seu protagonismo regional e pela evolução de uma economia cada vez mais diversificada, cujas transformações impactam diretamente o meio ambiente. Diante do aumento da frequência das mudanças climáticas, especialmente sobre populações vulneráveis, torna-se urgente a adoção de estratégias de adaptação e mitigação. Nesse contexto, o uso integrado de geoprocessamento e inteligência artificial é fundamental para analisar as dinâmicas urbanas e orientar políticas públicas mais eficazes. Portanto, a presente proposta tem como objetivo apresentar mosaicos de uso e ocupação do solo para o município de Passo Fundo prevendo comportamentos e tendências relacionadas com eventos de ondas de calor. Para a realização da análise de uso e ocupação do solo foram utilizadas imagens de satélite de 2026 da base de dados do Sentinel 2 com no máximo 2% de cobertura de nuvem, fornecida pelo repositório disponível via Google Earth Engine (GEE). A classificação de uso e ocupação do solo foi realizada através da ferramenta de inteligência artificial *random forest* integrada ao GEE. Em relação ao delineamento do mapa de calor e áreas mais sensíveis à exposição a altas temperaturas, foi utilizada proposta de *land surface temperature* (LST) através das imagens de satélite *Landsat* 8 e comparado com o índice de diferença de vegetação normalizada (NDVI) via GEE. A perda de vegetação nativa potencializa eventos de ondas de calor, como observado no maciço urbano com temperaturas de superfície superiores a 37°C. Da mesma forma, quanto mais vegetação saudável e vigorosa (NDVI >0,6), menor a temperatura de superfície. Nas amostras delimitadas no presente estudo, obteve-se uma relação de R^2 próxima de 0,74, correlação negativa entre o NDVI e LST. Portanto, destacam-se que estratégias integradas de geoprocessamento aliado à ferramentas de inteligência artificial possibilitam a realização de diagnósticos e proposições de planejamentos para cidades e comunidades mais resilientes às mudanças climáticas.

Introdução

A intensificação de fenômenos potencializados pelas mudanças climáticas exigem de governos locais estratégias de adaptação, seja por excesso ou carência de chuvas (Rahmani & Fattahi, 2024), ciclones e tempestades tropicais (Germinario et al., 2026) ou por ondas de calor intensas (Adeyeri et al., 2025). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, 2023), o cenário de mudança climática mais favorável (SSP1-1.9/RCP 2.6) aponta para a limitação do aumento da temperatura para abaixo dos 1,5°C até 2100. Se por um lado os conflitos geopolíticos justificam a mudança estratégica da gestão energética para fontes não dependentes de combustíveis fósseis, por outro lado os períodos de guerras escancaram como a humanidade é dependente dessa fonte de energia (The Economist, 2026). Embora o cenário mais otimista seja o preconizado nas mesas de discussões sobre o futuro climático, o panorama atual aponta para outra direção, mais pessimista e de aumento da temperatura global. Dessa forma, considerando as cidades e aglomerados urbanos, a emergência climática surge na forma de enchentes, estiagem ou ondas de calor. Tais fenômenos podem ser observados e previstos através de mapeamento das dinâmicas de uso e ocupação do solo no território. O geoprocessamento aplicado na classificação de uso e ocupação permite ainda direcionar estudos ambientais, incluindo gestão de recursos naturais, planejamento urbano e mudanças climáticas (Wang et al., 2023). Em relação às ondas de calor, progressivamente mais frequentes nas cidades, manifestam-se principalmente através das ilhas de calor urbanas (ICU), representando riscos de saúde pública, principalmente para populações mais vulneráveis (Shaamala et al., 2025).

Os satélites que possuem capacidade de detectar a radiação infravermelha térmica como o Landsat 8, são equipados com sensores TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) (NASA, 2025), capazes de calcular a temperatura da superfície e prever zonas com maior influência de ilhas de calor urbanas. O emprego da ferramenta de NDVI aliado à previsão de ondas de calor possibilita relacionar as zonas de maior incidência de vegetação com os oásis urbanos. As relações entre NDVI e LST têm sido amplamente exploradas na literatura, como no estudo de Garai et al. (2022) que analisaram a correlação entre os parâmetros, incorporando a variável precipitação, e observaram correlações negativas significativas, com coeficiente de determinação (R^2) de aproximadamente 0,86. Assim o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e a temperatura da superfície terrestre (LST) são dois parâmetros derivados de satélite amplamente utilizados que têm fornecido informações valiosas sobre a saúde da vegetação, as mudanças na cobertura do solo e as interações climáticas em diversos ecossistemas (Rahimi et al., 2025). Dessa forma, apresentar a interpretação compreender as dinâmicas espaços-temporais associadas às variáveis biofísicas locais torna-se fundamental para subsidiar estratégias de adaptação climática. Nesse sentido, a análise integrada entre uso e ocupação do solo, índice de vegetação e temperatura de superfície permite compreender como a expansão urbana e a redução da cobertura vegetal influenciam a intensificação das ilhas de calor urbanas. Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar as mudanças na configuração espacial do município de Passo Fundo (RS) e suas implicações sobre a distribuição térmica da superfície, fornecendo subsídios para o planejamento de cidades mais resilientes às mudanças climáticas.

Material e Métodos

O local de estudo é a cidade de Passo Fundo, localizada na região norte do Rio Grande do Sul (Figura 1). O município se destaca pelo polo em saúde e educação, alicerces para o desenvolvimento econômico regional. Do ponto de vista ambiental, a cidade possui o título de "berço das águas" por concentrar nascentes de cinco bacias hidrográficas, além de possuir reservas urbanas de patrimônio natural (RPPN's) que contribuem para o microclima local. Para a confecção dos mapas de uso e ocupação do solo foi utilizado a plataforma do *Google Earth Engine* (GEE), com as imagens detalhadas de acordo com a Tabela 1. A classificação foi realizada através da metodologia de inteligência artificial *random forest,* com número de árvores para a estabilidade igual a 8 *(n_estimators),* através de polígonos de amostras para cada tipo de classe: água, urbano, agricultura e floresta (Figura 2). Em relação à análise de uso e ocupação, foi utilizado o coeficiente de Kappa para analisar a confiabilidade interavaliadora nos dados, especialmente para descartar previsões que podem ocorrer pelo acaso.

A análise de temperatura da superfície foi realizada através do uso de imagens LANDSAT 8 LST (*land surface temperature*) com informações detalhadas na Tabela 1. Os resultados de LST representam uma medida de energia térmica emitida, que é detectada pelo sensoriamento remoto através de faixas termais específicas, geralmente entre 8 a 14 micrômetros, permitindo uma estimativa precisa das condições térmicas em áreas urbanas e rurais (Zhang et al., 2024). Para potencializar a interpretação das zonas de ondas de calor no território, foi utilizada a análise de NDVI através de imagens de satélite SENTINEL 2 nas bandas 8 (infravermelho próximo) e 4 (vermelho). O código de entrada no GEE foi *image.normalizedDifference,* privilegiando imagens com cobertura de nuvem menor de 5%.

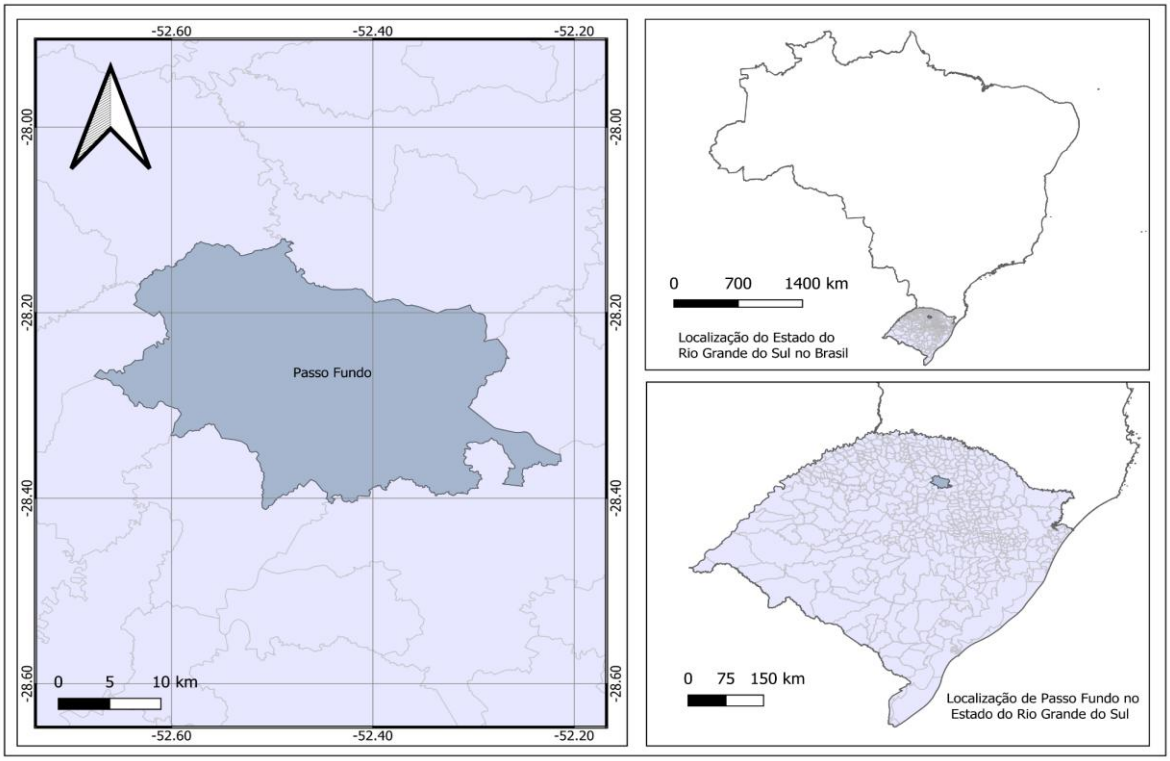


Figura 1. Mapa de localização do município de Passo Fundo/RS.
Fonte: Autores (2026).

Análise	Base de dados	Data	Cobertura de nuvem
UOS 2026	Copernicus Sentinel-2	05/02/2026	1,03%
LST 2026	Landsat 8 *Land Surface Temperature* (LST)	22/02/2026	1%
NDVI 2026	Copernicus Sentinel-2 (Banda 8 e Banda 4)	06/01/2026	3,41%

Legenda: UOS - Uso e Ocupação do Solo; LST - *Land Surface Temperature*; NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*.

Tabela 1. Dados das imagens utilizadas no estudo.

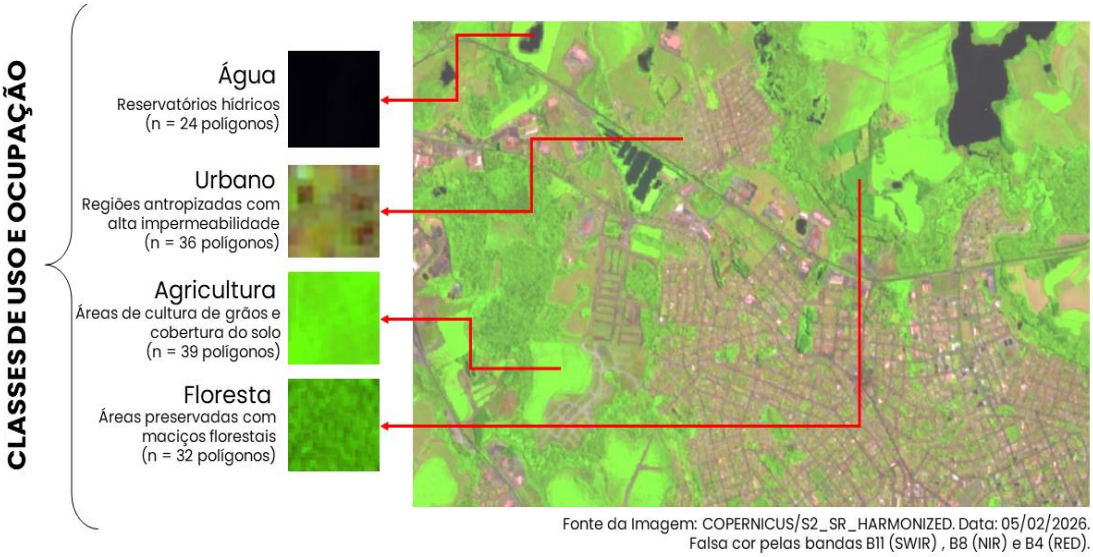


Figura 2. Amostras para a classificação de uso e ocupação do solo.
Fonte: Autores (2026).

Resultados e Discussão

Em relação ao uso e ocupação do solo, observa-se principalmente a presença extensa de áreas de cultura de grãos (72,87% do território), destacando o forte viés econômico da agricultura na região, embora indique perda de vegetação nativa de mata atlântica e campos (bioma pampa). O índice Kappa para UOS apresentou resultados superiores a 0,99, evidenciando a confiabilidade nos dados de uso e ocupação do solo.

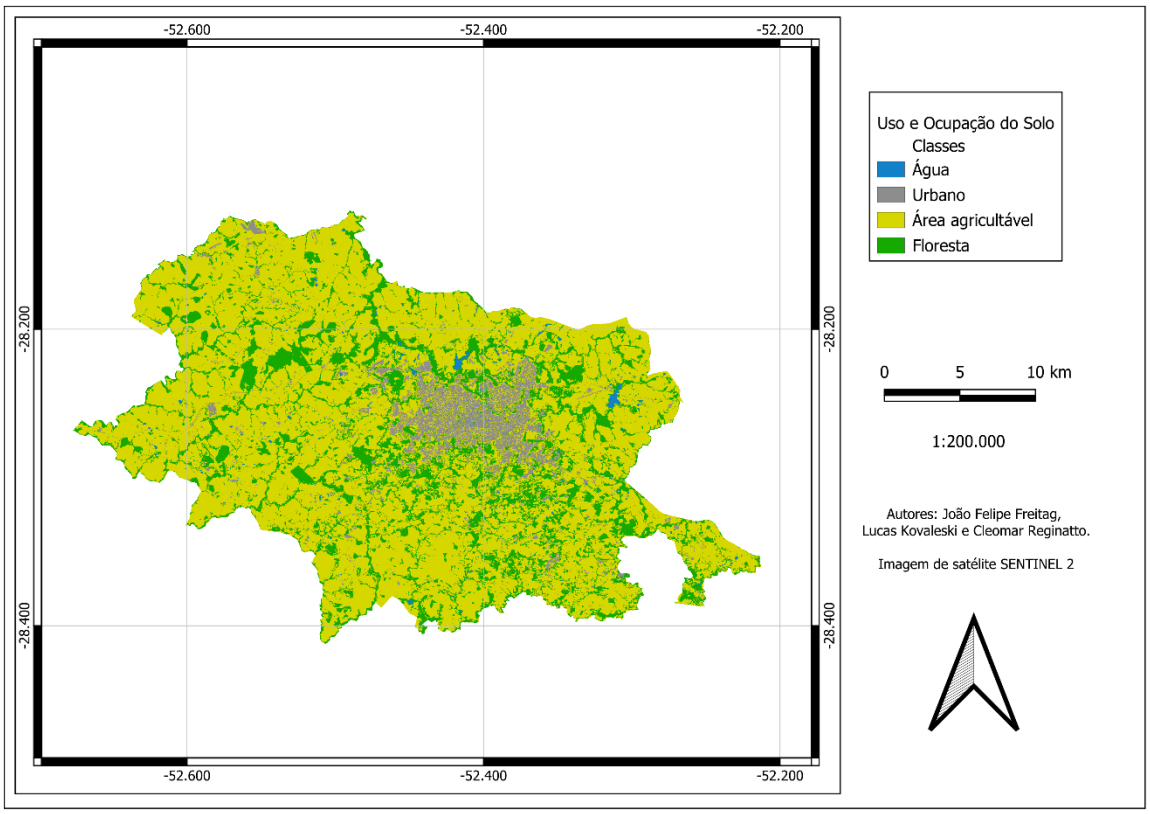
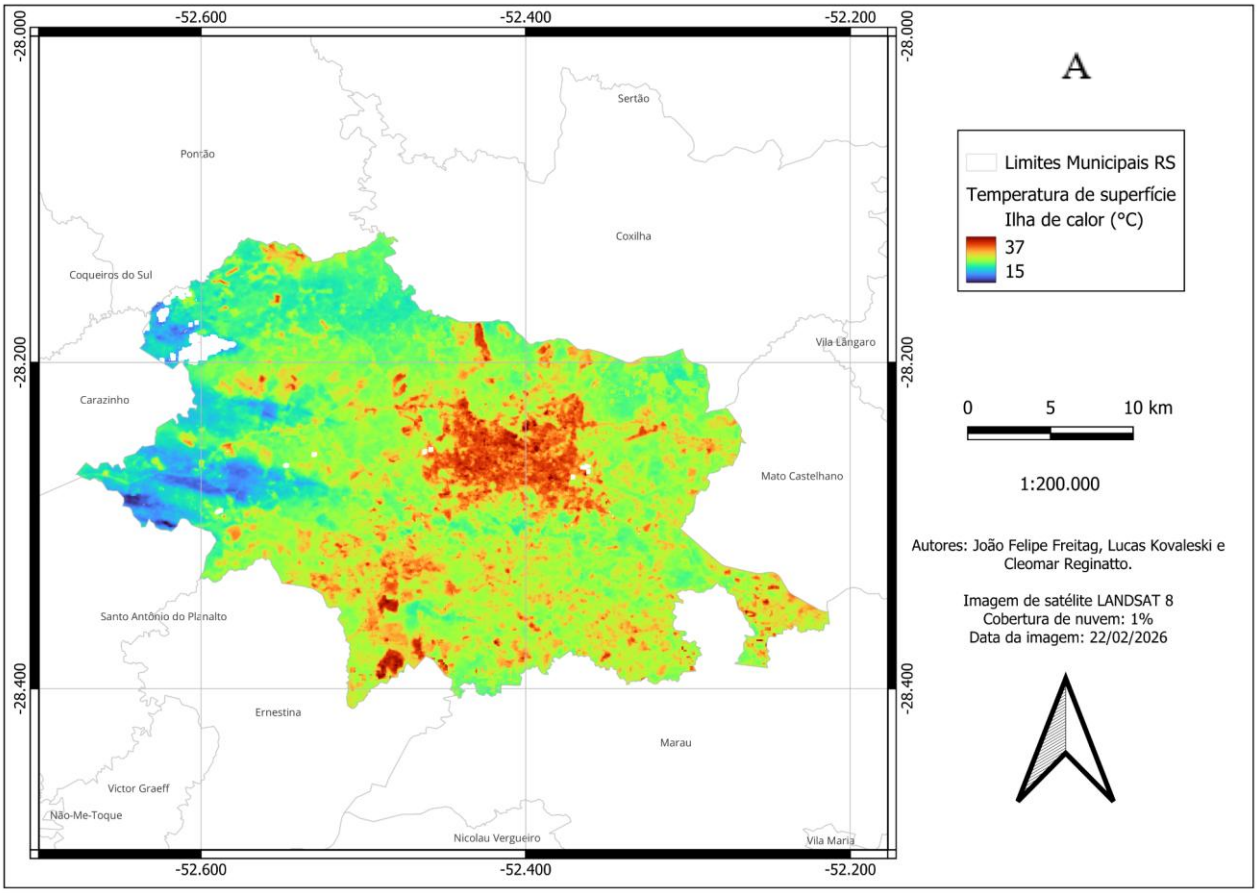


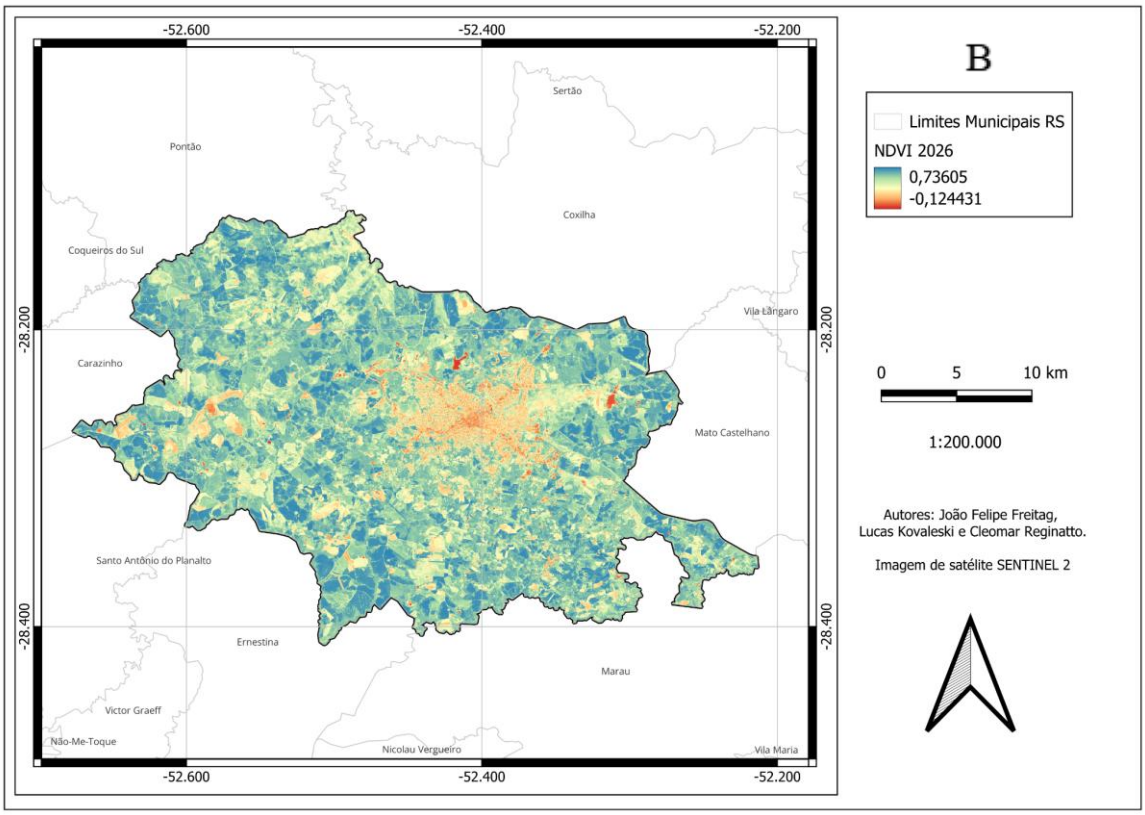
Figura 3. Mapa de uso e ocupação do solo para o ano de 2026.
Fonte: Autores (2026).

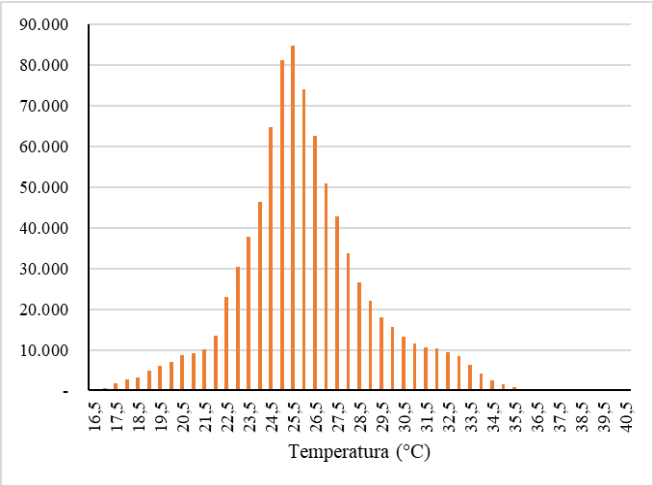
Uso e ocupação do solo	Área por classe							
	Água		Urbano		Agricultura		Floresta	
	km²	hectare	km²	hectare	km²	hectare	km²	hectare
2026	4,67	4.673.300	45,02	45.020.900	565,23	565.232.500	169,24	169.240.400
% da área	0,60%		5,89%		72,87%		20,64%	

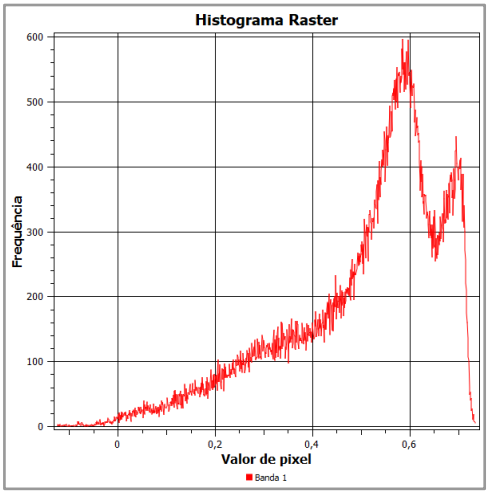
Tabela 2. Composição de áreas de uso e ocupação do solo para o ano de 2026.

A figura 4 (A) apresenta os mapas de calor e os valores de NVDI (B) para o ano de 2026. Os valores dos histogramas representam a frequência de dados de temperatura (C) e a frequência do índice de vegetação (D), destacando maior presença das temperaturas de 25,5°C e índice de vegetação de 0,55. O mapa de calor fortalece a interpretação das ilhas de calor urbanas, associadas às regiões mais antropizadas e de solo exposto (áreas de região sul e norte do município). A região central da cidade concentra maciços urbanos com predomínio de materiais impermeáveis, como concreto e asfalto, que substituem a cobertura vegetal e reduzem significativamente os índices de vegetação. De forma semelhante, áreas de solo exposto apresentam baixa biomassa e limitada cobertura vegetal, enquanto reservatórios hídricos registram valores reduzidos ou negativos devido à resposta espectral da água na banda de infravermelho próximo (NIR).









C D

Figura 4. Mapa de calor de Passo Fundo (A); Mapa de NDVI de Passo Fundo (B), Histograma das temperaturas (C); Histograma do NDVI (D).

Segundo Romero et al. (2020), as ilhas de calor são formadas em áreas urbanas e suburbanas, devido os materiais de construção absorverem e reterem maior calor do sol, quando comparado aos materiais naturais presentes em áreas que não sofreram processo de urbanização. Portanto, as mudanças de uso e ocupação do solo estão diretamente relacionadas com a retenção de calor em superfície, colaborando com impactos na qualidade de vida da população.

No estudo de Duarte & Muñoz (2025) os oásis urbanos surgem como refúgios climáticos com soluções baseadas na natureza sendo regiões estratégicas que servem como refúgio a altas temperaturas em períodos de ondas de calor. Na área urbana do município de Passo Fundo, os oásis urbanos podem ser encontrados nas Reservas Particulares de Patrimônio Natural (RPPN's) e em praças e parques da cidade. Um exemplo que demonstra o potencial dessas áreas é a Reserva Maragato, que em sua extensão tem regiões com até 25,04°C e logo na região próxima do Bairro Valinhos a temperatura registrada foi de 33,11 °C.

Dessa forma, outro indicador que se relaciona com a severidade das ondas de calor está relacionado diretamente com a presença de vegetação. De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), a arborização de

vias públicas chegou a 67,53%, ficando na posição 185° do Estado, evidenciando o potencial de estruturação do Plano Municipal de Arborização Urbana.

ID	Característica	Coordenadas UTM	Temperatura de Superfície (LST)	NDVI	Estatística dos dados
RPPN Maragato	Fragmento de floresta preservada	-52,45481° -28,23543°	25,69°C	0,6033	$R^2 = 0,7411$
Parque Banhado da Vergueiro	Parque Ambiental Urbano	-52,414978° -28,254351°	28,89°C	0,6319	
Estacionamento de Shopping	Pavimentação asfáltica/ impermeável	-52,38461° -28,27061°	39,77°C	0,0228	
Ruas Centrais	Pavimentação - região central	-52,40673° -28,2613°	32,86°C	0,0040	
Zona agrícola	Culturas agrícolas (cultivo de soja)	-52,40963° -28,2945°	27,08°C	0,5651	

Tabela 3. Amostra de pontos no território e relações entre LST e NDVI.

Na correlação apresentada na Tabela 3 é possível observar a correlação negativa entre o LST e o NDVI. Zonas pouco urbanizadas apresentam os maiores índices de NDVI e menores temperaturas, como observados nas áreas das RPPN's. Por outro lado, um dos pontos mais quentes da cidade (temperatura = 39,77°C - Estacionamento de Shopping Center), apresentou resultados de NDVI de 0,0228. No estudo de Rahimi et al. (2025), foi comparado a relação entre NDVI e LST no nível global, revelando regiões com correlações negativas, o que destaca os efeitos de resfriamento da vegetação e destacando o papel crucial da vegetação na regulação das temperaturas da superfície, fornecendo informações valiosas sobre a saúde do ecossistema e orientando estratégias de conservação em resposta às mudanças climáticas.

Sabe-se, portanto, que durante as ondas de calor, as altas temperaturas exercem efeitos negativos na saúde humana, resultando em riscos de doenças cardiovasculares e respiratórias, insolação e anormalidades neurológicas, sendo que a sociedade global e os governos locais devem dar mais atenção às populações vulneráveis, como crianças, idosos, gestantes e grupos de baixa renda (European Society of Cardiology, 2025). Do ponto de vista de estratégias de adaptação das mudanças climáticas, principalmente referente às ondas de calor, o direcionamento deve ser voltado a questões de fomento e desenvolvimento de zonas verdes, pautado pelo desenvolvimento do Plano Municipal de Arborização. Como mitigação, deve-se tomar como base previsões nos meses de verão que indicam temperaturas superiores ao limite de alerta, além de estabelecer pontos de hidratação e de conforto térmico em áreas de grande fluxo e maior circulação.

Como exemplo de resposta a eventos climáticos de ondas de calor, pode-se utilizar a cidade do Rio de Janeiro, que após sucessivos eventos, a Prefeitura Municipal lançou o Protocolo de Enfrentamento ao Calor Extremo (2024). O documento estabelece cinco diferentes índices de níveis de calor (NC) que passam desde a Preparação (NC1) até o nível mais grave de Resposta e Reabilitação (NC5). Deste protocolo, destacam-se os eixos pilares do plano de ação: Assistência e Prevenção, Infraestrutura e Adaptação dos Serviços, Vigilância em Saúde, Vigilância Sanitária, Comunicação e Gestão. No contexto de Passo Fundo, como estratégias de adaptação frente ao panorama de elevação das temperaturas provocado pelas mudanças climáticas, destaca-se algumas medidas que os órgãos públicos podem seguir para reduzir os impactos à população: a) implementar e monitorar o Plano Municipal de Arborização Urbana para elevar o índice de arborização das vias públicas; b) emitir alertas quando previsão de temperaturas superiores ao limite de segurança; c) disponibilizar em regiões estratégicas da cidade pontos de hidratação gratuitos além de suporte básico à saúde; e d) capacitação dos funcionários dos centros de assistência básica de saúde (UBS, CAIS, ESF) acerca de orientações para atuar em cenários de ondas de calor.

Considerações Finais

O uso de inteligência artificial aliada ao SIG pode ser aliado importantes para o planejamento urbano e identificação de áreas críticas e mais vulneráveis aos efeitos climáticos. No cenário apresentado, a aplicabilidade da ferramenta se justifica frente às ondas de calor, sendo que a utilização das metodologias pode prever comportamentos relacionados com riscos de enchentes, estiagens, dispersão de poluentes atmosféricos e até mesmo incêndios florestais. A proposição de um território mais preparado para os desafios climáticos repercute em diversos âmbitos, tornando as cidades mais responsivas, adaptadas, inclusivas e, sobretudo, justas, principalmente considerando que os maiores impactos repercutem entre as comunidades mais vulneráveis.

Agradecimentos

Os autores declaram seu agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio do processo n° 141966/2025-4 e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Passo Fundo (PPGEng-UPF).

Referências Bibliográficas

Adeyeri, O. E., Zhou, W., Ndehedehe, C. E., Ishola, K. A., Laux, P., Akinsanola, A. A., ... & Wang, X. (2025). Global heatwaves dynamics under climate change scenarios: multidimensional drivers and cascading impacts. Earth's Future, 13(6), e2025EF006486.

Duarte, D., & Muñoz, L. S. (2025). Oásis urbanos para adaptação ao calor: a emergência silenciosa. Ciência e Cultura, 77(3), 50-58.

European Society of Cardiology. Heat extremes and cardiovascular diseases. European Heart Journal, Oxford, 2025. Disponível em: https://academic.oup.com/eurheartj/advance-article/doi/10.1093/eurheartj/ehaf326/8155633. Acesso em: 30 abril 2026.

Garai, S., Khatun, M., Singh, R., Sharma, J., Pradhan, M., Ranjan, A., Rahaman, S.M., Khan, M.L., Tiwari, S. (2022) Assessing correlation between Rainfall, normalized difference Vegetation Index (NDVI) and land surface temperature (LST) in Eastern India. Saf. Extrem. Environ. v. 4, p. 119–127.

Germinario, L., McLelland, S. J., & Mazzoli, C. (2026). Underwater cultural heritage and extreme events: Storm impacts under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences, 123(12), e2523844123.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Passo Fundo: panorama. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d.]. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/passo-fundo/panorama. Acesso em: 30 de abril 2026.

IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023.

NASA. Thermal Infrared Sensor (TIRS). 2025. Disponível em: https://science.nasa.gov/mission/landsat/tirs/. Acesso em: 10 abr. 2026.

Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro. Protocolo de Enfrentamento ao Calor Extremo. Rio de Janeiro: Secretaria Municipal de Saúde, 2024. Disponível em: https://saude.prefeitura.rio/protocolo-de-calor/. Acesso em: 16 abr. 2026.

Rahimi, E., Dong, P., & Jung, C. (2025). Global NDVI-LST correlation: Temporal and spatial patterns from 2000 to 2024. Environments, 12(2), 67.

Rahmani, F., Fattahi, M. H. (2024). Investigation of alterations in droughts and floods patterns induced by climate change. Acta Geophysica, 72(1), 405-418.

Romero, C. W. D. S., Silva, H. R., Marques, A. P., Macedo, F. L. D., Faria, G. A., & Alves, M. C. (2025) Relação entre as ilhas de calor e uso e ocupação do solo em centros urbanos de pequeno porte utilizando o sensoriamento remoto. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 39, n. 1, p. 253 - 268.

Shaamala, A., Tilly, N., & Yigitcanlar, T. (2025). Leveraging urban AI for high-resolution urban heat mapping: Towards climate resilient cities. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 52(9), 2251-2266.

The Economist. Brazil has a secret weapon against oil shocks. 26 mar. 2026. Disponível em: https://www.economist.com/the-americas/2026/03/26/brazil-has-a-secret-weapon-against-oil-shocks. Acesso em: 9 abr. 2026.

Wang, Y., Sun, Y., Cao, X., Wang, Y., Zhang, W., & Cheng, X. (2023). A review of regional and Global scale Land Use/Land Cover (LULC) mapping products generated from satellite remote sensing. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 206, 311-334.

Zhang, D., Chang L., Jiansheng W., Hongliang W. (2024) A satellite-based approach for thermal comfort simulation: A case study in the GBA Urban Climate, v. 53 (March 2023), p. 101776.

ANÁLISE COMPARATIVA DE DEM NA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE RUIDO

1 Giovana Krzesinski, 2 Rodrigo Scoczynski Ribeiro, 3 Joice Cristini Kuritza Denck Gonçalves, 4 Dimaghi Schwamback[4]

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: gio.vanak.gk@gmail.com; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: rodrigosribeiro@utfpr.edu.br; 3 Universidade Federal do Paraná, e-mail: joicekuritza@ufpr.br; 4 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: dimaghis@utfpr.edu.br

Palavras-chave: Modelos Digitais de Elevação; Ruído Urbano; Mapas de Ruído.

Resumo

A poluição sonora constitui um dos principais desafios ambientais em áreas urbanas, impactando diretamente a saúde e o bem-estar da população. Nesse contexto, a modelagem acústica urbana depende da qualidade dos dados geoespaciais utilizados, especialmente dos Modelos Digitais de Elevação (DEMs), que influenciam a simulação da propagação sonora. Este estudo teve como objetivo comparar o desempenho de diferentes DEMs (SRTM, Topodata, Copernicus e FABDEM) na elaboração de mapas de ruído no bairro Cidade dos Lagos, em Guarapuava (PR). A metodologia envolveu a utilização do software NoiseModelling para simulação acústica, integrando dados de tráfego e geometria urbana em ambiente QGIS, seguida de análise comparativa em Python. Os resultados indicaram variações de similaridade entre os modelos, evidenciando que a presença de elementos não topográficos, como edificações e vegetação, pode comprometer a precisão das simulações. O FABDEM apresentou melhor desempenho por representar de forma mais fiel o terreno natural, reduzindo interferências artificiais. Conclui-se que a escolha adequada do DEM é fundamental para garantir maior confiabilidade em estudos de acústica urbana, sendo recomendada a utilização de modelos que separem a topografia dos elementos urbanos.

Introdução

A poluição sonora é um dos principais problemas ambientais da urbanização contemporânea, sendo reconhecida como um fator negativo na saúde pública e na qualidade de vida da população. A exposição contínua a elevados níveis de ruído resulta em distúrbios do sono, estresse e problemas cognitivos, tornando o planejamento e a gestão das cidades um desafio. A problemática de acústica urbana manifesta-se de forma significativa em aeroportos, ferrovias e zonas industriais, mas principalmente em áreas de alto fluxo veicular.

Como resposta a esses impactos, leis e normas foram estabelecidas a fim de regulamentar e mitigar o ruído ambiental. No contexto europeu, a Diretiva Europeia de Ruído Ambiental (iEnvironmental Noise Directive - END) descreveu indicadores Lden e Lnight, amplamente utilizados para identificar áreas onde limites regulamentados de ruído são excedidos (Murphy e King, 2010; O'Malley et al., 2009). Para o cumprimento das normas, os estados são obrigados a produzir mapas estratégicos de ruído que representem a exposição sonora das principais infraestruturas de transporte e fontes urbanas.

A produção de mapas de ruído depende da integração de dados acústicos, urbanos e geoespaciais adequados, já que representam as condições reais dos locais estudados. Nesse contexto, a modelagem espacial é fundamental, uma vez que a propagação do som é influenciada pela topografia, presença de obstáculos e configuração da cidade. Assim, os Modelos Digitais de Elevação (*Digital Elevation Models* - DEMs) são fundamentais para a simulação acústica, pois descrevem a superfície terrestre.

Os DEMs são representações digitais da elevação da superfície terrestre, apresentadas em formato de *raster*. Para o ambiente urbano, os DEMs possuem dados de edificações, pontes, taludes e vegetações existentes.

O uso de DEMs de alta resolução impõe desafios computacionais significativos. Os modelos com resolução de 5 m , por exemplo, podem demandar dezenas de milhares de pontos por quilômetro quadrado, tornando inviáveis estudos de grande escala, principalmente em áreas metropolitanas. A elevada densidade de dados pode comprometer o desempenho dos softwares e dificultar a análise de resultados, tornando necessária a aplicação de técnicas de simplificação ou generalização de modelos de elevação.

Diante disso, torna-se evidente a necessidade de investigar o uso de diferentes DEMs, com diferentes resoluções, métodos de aquisição e níveis de detalhamento. A comparação entre os modelos permite avaliar precisão acústica, custo computacional e viabilidade operacional, contribuindo para estudos de acústica urbana mais eficazes.

Assim, o objetivo deste artigo é analisar e comparar o desempenho de diferentes DEMs na elaboração de ruído urbano e como suas características geométricas influenciam a modelagem da propagação sonora. A análise foi realizada a partir da modelagem dos níveis de ruído no bairro planejado Cidade dos Lagos, localizado no município de Guarapuava, Paraná, Brasil.

Metodologia

Os mapas de ruído são fundamentais para a análise ambiental urbana, pois permitem a visualização espacial do comportamento acústico e a verificação de níveis de pressão sonora conforme a ocupação do solo (Gerges, 2000). Nesse estudo, os mapas de ruído foram elaborados por meio de simulação acústica, utilizando o software Noise Modelling, baseando-se em modelos matemáticos de emissão e propagação sonora.

A construção dos mapas demandou a modelagem espacial detalhada do bairro Cidade dos Lagos, que apresenta diversos setores, apresentados na Figura 1. A modelagem considerou a malha viária, a geometria urbana e o volume de tráfego veicular

da área analisada. A base geométrica foi retirada de arquivo no formato *Street Map*, contendo representação das vias, edificações e áreas livres. Os dados vetoriais foram incorporados ao ambiente QGIS.

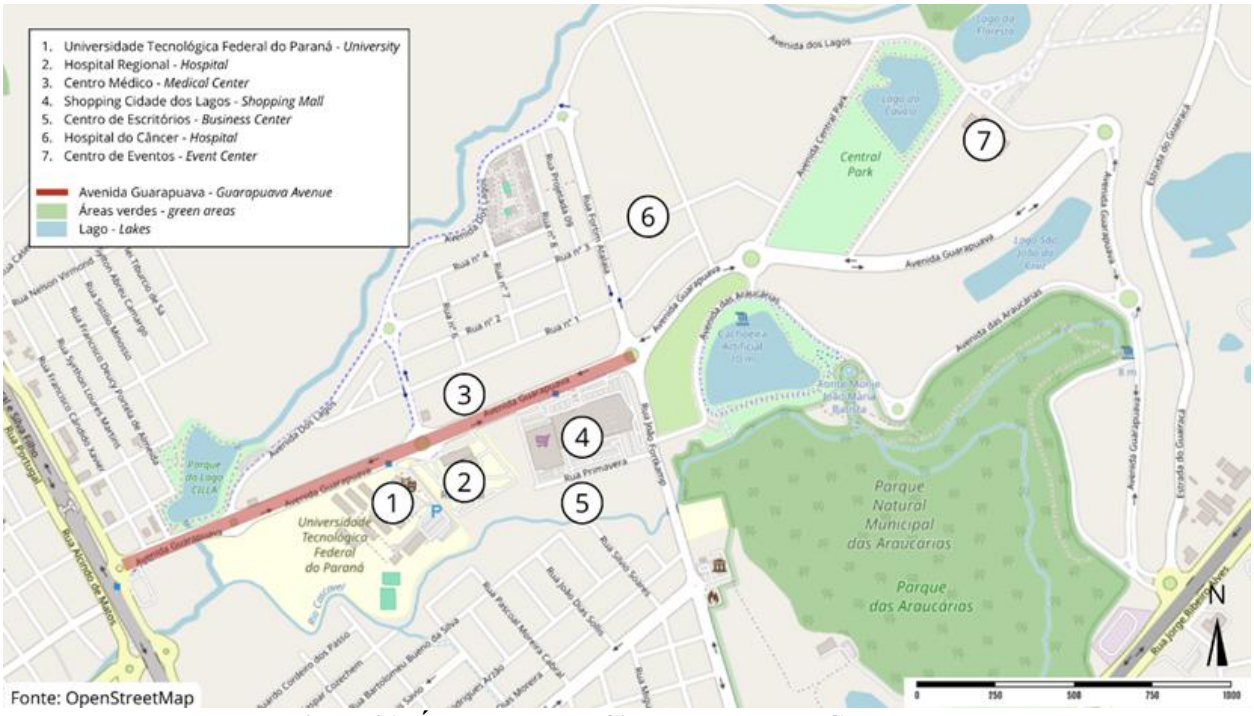


Figura 01: Área de estudo: Cidade dos Lagos - Guarapuava
Fonte: Autora (2026)

Para a análise comparativa, foram utilizados quatro DEMs: FABDEM, Copernicus, Topodata e SRTM, os quais apresentam diferentes métodos de aquisição, resoluções e níveis de detalhamento, conforme apresentado na Tabela 1, permitindo avaliar suas influências na modelagem da propagação sonora.

DEM	Origem	Ano/ Base	Resolução Espacial	Precisão vertical	Limitações
SRTM	NASA (EUA)	2000	30 m	~10 m	Erros em áreas montanhosas; Lacunas interpoladas
TOPODATA	INPE (Brasil)	Derivado e refinado do SRTM	30 m	±5 m	Restrito ao território nacional
COPERNICUS	ESA (UE)	Base radar TanDEM	30 m	±1 a 2 m	Arquivos muito grandes
FABDEM	University of Bristol	2022 (base Copernicus GLO-30)	30m	± 2 a 3 m	Falhas em áreas urbanas densas

Tabela 01: Especificações dos DEMs utilizados
Fonte: Autora (2026)

A simulação acústica foi realizada no NoiseModeling, adotando o mesmo conjunto de parâmetros, a fim de comparar os resultados. As fontes sonoras foram associadas às vias urbanas, considerando informações sobre fluxo de tráfego, velocidade média e características das vias.

Posteriormente, os mapas acústicos gerados foram inseridos em ambiente Python, que possibilitou avaliar o grau de similaridade entre mapas e a distribuição percentual da área por cada faixa de nível de pressão sonora.

Discussões

A qualidade e a adequação dos DEMs influenciam a confiabilidade das simulações acústicas urbanas, já que a topografia, vegetação e prédios afetam a propagação das ondas sonoras. Os mapas de ruído derivados de cada DEM utilizado no bairro Cidade dos Lagos, Figuras 2 (a) a (d), apresentaram diferenças levemente perceptíveis visualmente.

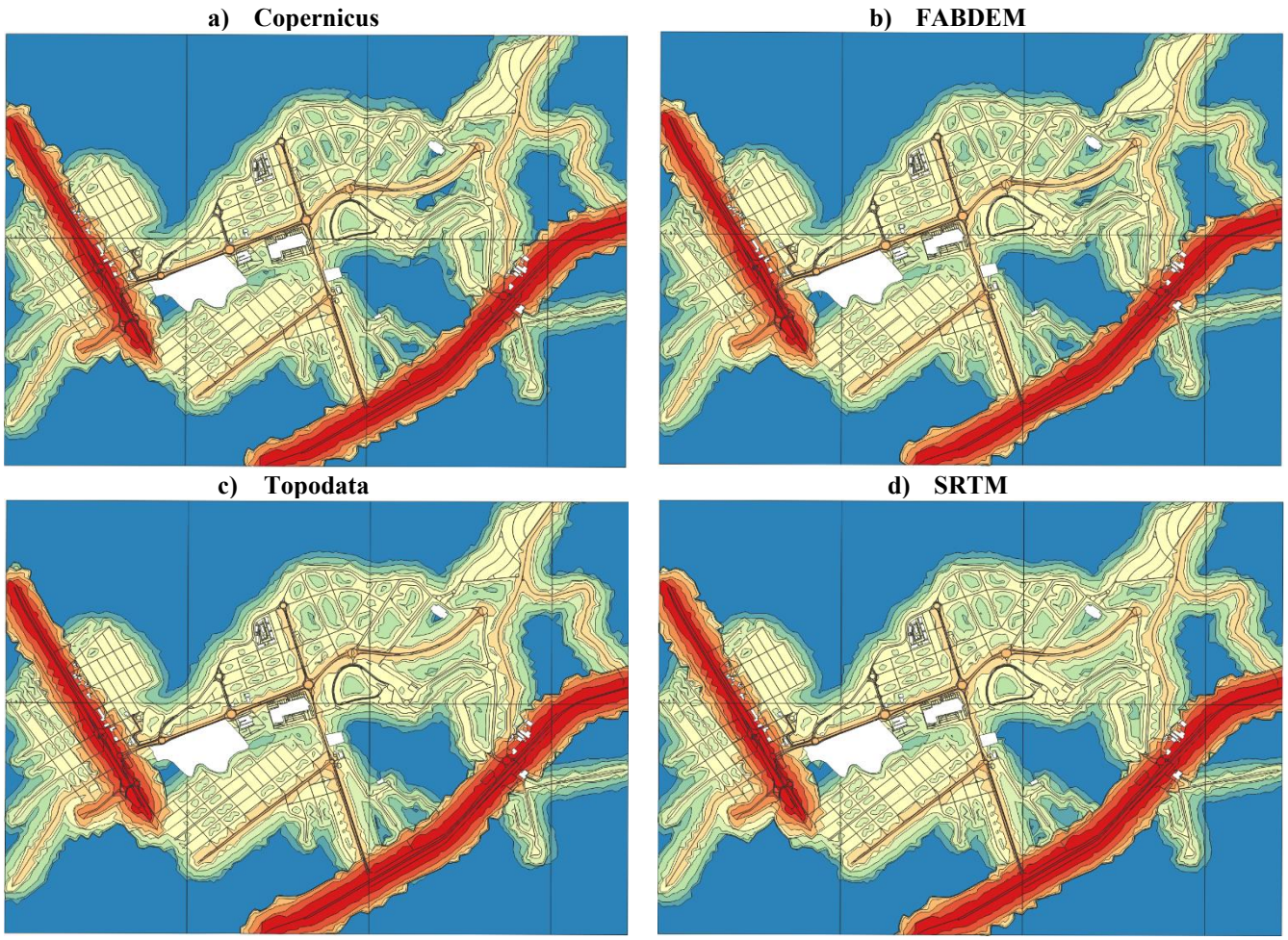


Figura 02: Mapa de ruídos Cidade dos Lagos – Guarapuava
Fonte: Autora (2026)

Os quatro modelos (SRTM, Topodata, Copernicus e FABDEM)foram comparados em pares, obtendo-se, assim, a porcentagem de similaridades entre eles apresentada na Tabela 2, criada a partir da comparação pixel a pixel dos mapas.

	TOPODATA	SRTM	FABDEM
SRTM	60,66%		
FABDEM	56,18%	55,29%	
COPERNICUS	50,92%	52,65%	48,49%

Tabela 02: Similaridades entre DEMs
Fonte: Autora (2026)

A comparação entre SRTM e Topodata atingiu 60,66%, indicando que o reprocessamento nacional do INPE tem ganhos topográficos para o território brasileiro. Entre o Copernicus e FABDEM, apresentou 48,49% de concordância, o que retrata que a remoção de vegetações e edificações altera significativamente a superfície ao se aproximar do terreno natural. Já entre o FABDEM e o Topodata, expõe o confronto de um DEM global corrigido por Machine Learning e um refinado DEM nacional, que oferece melhor coerência, de 56,18%, do que quando comparados ao Copernicus e ao SRTM original.

Analisados em pares, os modelos Topodata e FABDEM têm maior consistência, enquanto o Copernicus difere por não remover interferências de árvores e edificações. O SRTM apresenta bons resultados, porém apresenta limitações nas representações de superfícies urbanas densas, pela grande presença de edificações.

Considerações Finais

A análise comparativa entre os DEMs evidencia que a escolha da base topográfica influencia diretamente na confiabilidade e precisão das simulações acústicas urbanas. Mesmo que os mapas apresentem diferenças sutis, a análise mostrou variações na comparação entre os modelos.

Os resultados indicam que modelos que consideram elementos não topográficos, como edificações e vegetações, tendem a haver distorções na modelagem sonora. Por isso, para estudos de acústica urbana, recomenda-se o uso de modelos que representem o terreno real com mínima interferência de elementos não topográficos, uma vez que as barreiras acústicas artificiais devem ser modeladas em camadas separadamente, evitando dupla contabilização. Os modelos que incluem esses volumes artificiais tendem a distorcer as análises de difração e atenuação do som, podendo causar incertezas em zonas de sombras acústicas e reflexões.

Nesse contexto, o FABDEM destacou-se como o mais adequado para modelagem e análise da propagação do ruído urbano, especialmente em simulações acústicas que exigem representação fiel do terreno e modelagem vetorial independente de obstáculos urbanos tridimensionais.

Por fim, este estudo reforça a escolha criteriosa dos dados de entrada em modelagens ambientais, destacando que a qualidade da simulação depende também do modelo geoespacial utilizado. Para possíveis futuros estudos, recomenda-se a investigação de resoluções espaciais integradas a dados tridimensionais urbanos mais detalhados, a fim de aprimorar mais as simulações acústicas urbanas.

Referências Bibliográficas

GERGES, Samir N. Y. **Ruído: fundamentos e controle**. 2. ed. Florianópolis: NR Editora, 2000.

MURPHY, Enda; KING, Eoin A. **Environmental Noise Pollution: Noise Mapping, Public Health, and Policy**. Oxford: Elsevier, 2014.

O'MALLEY, V.; KING, E. A.; MURPHY, E. **Strategic environmental noise mapping**: Methodological issues concerning the implementation of the EU Environmental Noise Directive and their policy implications. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 36, n. 3, 2010.

EUROPEAN UNION. **Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council relating to the assessment and management of environmental noise**. Official Journal of the European Communities, 2002.

NASA; NGA. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. 2000. Disponível em: https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/srtm . Acesso em: dez.2025.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **TOPODATA: Banco de dados geomorfométricos do Brasil**. Disponível em: http://www.dsr.inpe.br/topodata/ Acesso em: dez. 2025.

ESA – European Space Agency. **Copernicus DEM (GLO-30)**. Disponível em: https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/copernicus-contributing-missions/collections-description/COP-DEM . Acesso em:.dez. 2025.

UNIVERSITY OF BRISTOL **FABDEM: Forest And Buildings removed Copernicus DEM**. 2022. Disponível em: https://data.bris.ac.uk/data/dataset/s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn . Acesso em: dez. 2025.

ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO COMO MONITORAMENTO AMBIENTAL DE UM PARQUE URBANO

1 Pedro Henrique Felipe da Silva, 2 Elka Élice Vasco de Miranda, 3 Emilly Tauany de Souza Rocha, 4 Emilly Chaves Soares

1 Universidade Federal da Grande Dourados, e-mail: Pedromusic211@gmail.com; 2 Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, e-mail: elkaelice@gmail.com; 3 Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, e-mail: emillytauany98@gmail.com; 4 Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, e-mail: emilly21chaves@gmail.com

Palavras-chave: Infiltração hídrica; estrutura do solo; áreas verdes urbanas

Resumo

A crescente urbanização intensifica pressões sobre o meio ambiente, colocando os recursos hídricos e o solo sob risco de degradação. Em áreas urbanas, a impermeabilização do solo reduz a infiltração de água e aumenta o escoamento superficial, tornando as áreas verdes, como parques urbanos, importantes áreas para a regulação desses processos. Este estudo teve como objetivo realizar um monitoramento ambiental do parque Arnulpho Fioravante, município de Dourados/MS, avaliando os atributos físicos do solo ao redor de um lago presente no local. Foram coletadas 72 amostras indeformadas de solo em três profundidades, sendo as variáveis avaliadas: densidade do solo, umidade gravimétrica e porosidade total, além de ensaios de resistência mecânica do solo à penetração e velocidade de infiltração básica de água no solo. O delineamento adotado foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial, com medidas repetidas em profundidade, analisado por modelo linear misto e comparação de médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Não houve diferença significativa para as variáveis avaliadas, sendo atestada ausência de compactação do solo. Isto decorre dos valores que se mostraram dentro de seus limites críticos, além da VIB média de 23 mm h^{-1}, adequada para solos argilosos, indicando boa infiltração, o que favorece a recarga hídrica em ambiente urbano. A PCA explicou 92,5% da variância, apresentando relação inversa entre densidade e porosidade, e associação de resistência mecânica do solo à penetração com a umidade. Ao longo do perfil do solo, atribui-se que se encontra sob qualidade física, sendo eficiente no suporte às funções hidrológicas e no monitoramento ambiental de áreas verdes urbanas.

Introdução

Os recursos hídricos correspondem à parcela de água doce superficial e subterrânea acessível à humanidade, considerando suas particularidades e custos compatíveis com seus diversos usos. Estima-se que cerca de 60% da população mundial utilize águas subterrâneas como principal fonte de abastecimento, o que evidencia a relevância desses recursos para a sustentação das atividades humanas e dos ecossistemas (Campos *et al*., 2025). O aumento da população nas áreas urbanas tem provocado alterações ambientais significativas, especialmente quando ocorre de forma desordenada, pois a ocupação inadequada, com destaque para áreas próximas a canais fluviais, tem intensificado os impactos sobre os rios, constituintes fundamentais das bacias hidrográficas (Rosa *et al*., 2024).

Dessa forma, a crescente demanda por água, associada ao aumento populacional e à expansão urbana, tende a intensificar as pressões sobre o ciclo hidrológico. Tais fatores podem comprometer tanto a quantidade quanto a qualidade e a disponibilidade da água afetando, de forma direta, o bem-estar humano e o equilíbrio ambiental (Rosa *et al*., 2024). Dentro desta perspectiva, o solo e sua qualidade assumem papel fundamental na dinâmica hídrica, uma vez que seus atributos influenciam diretamente os processos de infiltração e recarga de água subterrânea. A degradação do solo no entorno dos cursos hídricos decorre da compactação, ocasionando processos erosivos favorecendo o transporte de sedimentos e poluentes para os corpos hídricos, impactando-os negativamente. Diante desse cenário, é imprescindível a adoção de estratégias de gestão racional e preventiva, de modo a assegurar a sustentabilidade ambiental destes ecossistemas e a disponibilidade de água para as gerações presentes e futuras. No contexto da legislação ambiental brasileira, a Lei nº 12.651/2012 define as Áreas de Preservação Permanente (APPs) como espaços protegidos, localizados em zonas rurais ou urbanas, no entorno de corpos hídricos, e restringe as atividades antrópicas, onde a conservação dessas áreas, aliada ao manejo adequado do solo e à manutenção da cobertura vegetal, desempenha papel fundamental na proteção destes locais (Campos *et al*., 2025). Nesse contexto, a qualidade do solo em parques urbanos torna-se um fator determinante para o desempenho dessas áreas como sistemas reguladores do ciclo hidrológico, uma vez que atributos do solo como porosidade, teor de matéria orgânica e grau de compactação influenciam diretamente a infiltração da água, a retenção hídrica e a filtragem de poluentes. São espaços verdes utilizados para o lazer e o contato da população com a natureza, ao mesmo tempo em que atuam como corredores ecológicos, promovendo a biodiversidade, a regulação microclimática e a filtragem de poluentes, inclusive em corpos d'água artificiais presentes nesses ambientes (Kabisch *et al*., 2016). Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo realizar um monitoramento ambiental do Parque Arnulpho Fioravante, no município de Dourados/MS, com diagnóstico dos atributos físicos do solo ao redor de um lago presente neste local.

Material e Métodos

Área de estudo

A pesquisa foi realizada no parque Arnulpho Fioravante, atrás do shopping do município de Dourados, Mato Grosso do Sul, entre as coordenadas geográficas 22°14'7.27" de Latitude Sul e 54°47'38.29" de Longitude Oeste. O solo é classificado como Latossolo vermelho (PMSB, 2019), sendo encontradas manchas de Gleissolo pela área. Localizada na região Centro-Sul do estado, a cidade de Dourados possui uma população que gira em torno de 225 mil habitantes, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), representando 14% do total de habitantes de Mato Grosso do Sul. O município possui parques e áreas verdes contando com a presença de lagos, como é o caso do parque em estudo, que possui área de 582.523,76 m^2, e o lago de 100.000 m^2 (Souza, 2016).

Os pontos de coleta das amostras de solo e água do parque foram georreferenciados e encontram-se representados no mapa presente na figura 1.

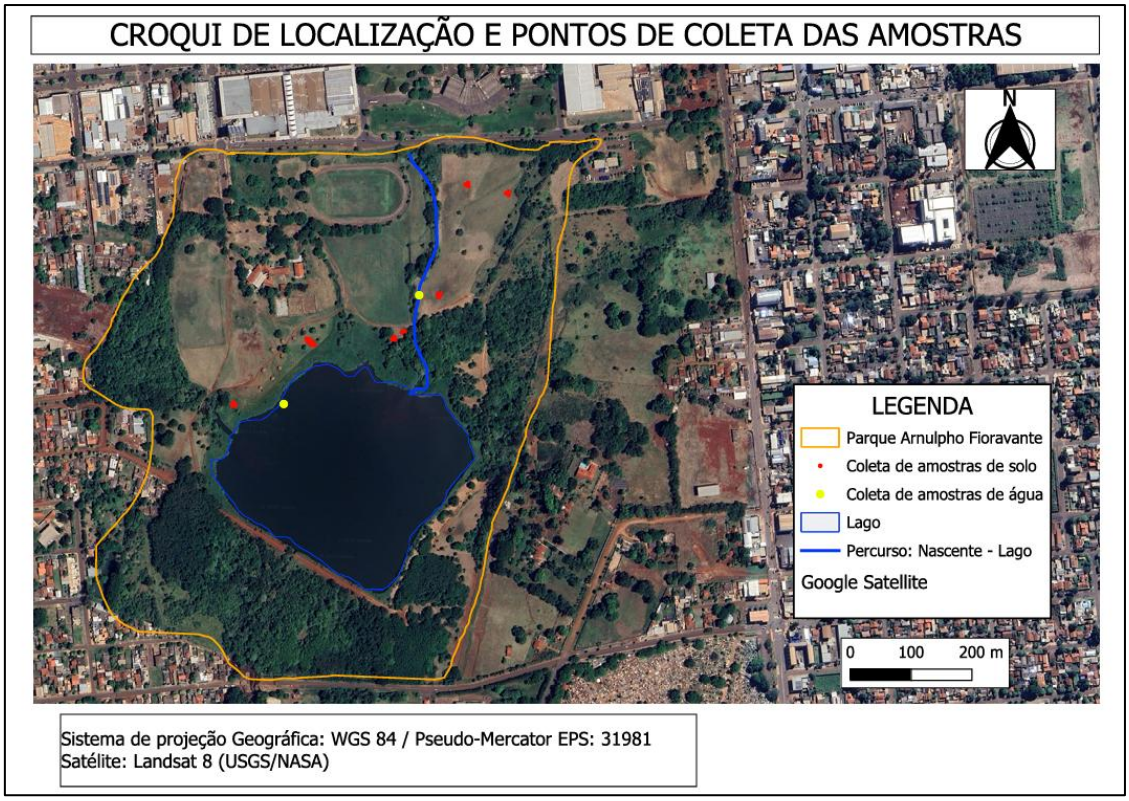


Figura 1: Mapa da localidade e pontos de amostragens
Fonte: Próprios autores (2026)

Coleta das amostras

As amostras de solo foram coletadas em anéis volumétricos com estrutura preservada em pontos distintos pela área no entorno do lago, utilizando-se como base a metodologia de Auler (2017). Em campo, os anéis foram acoplados em amostradores de Uhland e cravados no solo com auxílio de marreta com golpes suaves e constantes nas profundidades de 0-20 cm, 20-40 cm, e 40-60 cm. As amostras foram coletadas em oito pontos distribuídos ao redor do lago. Em cada ponto, foram estabelecidos três locais de amostragem, espaçados em 5 metros entre si e organizados em arranjo triangular, a fim de garantir repetições experimentais. Cada arranjo triangular resultou em um ponto de coleta da amostra de solo, totalizando 8 pontos, 3 profundidades e 3 repetições, perfazendo 72 amostras. A partir dessas amostras, diagnosticaram-se os atributos físicos do solo: densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), umidade gravimétrica (Ug) e análise granulométrica. A textura do solo foi determinada por meio de análise granulométrica, conforme descrito no manual de métodos de análises de solos (Embrapa, 2017). A densidade do solo foi determinada pela relação entre a massa da amostra de solo seco em estufa e o volume ocupado no anel cilíndrico, conforme os equacionamentos abaixo.

$$Ds = \frac{Mss}{V_a}$$

Onde: Ds é a densidade do solo (Mg m^{-3}), Mss é a massa de solo seco (Mg), e Va é o volume do anel volumétrico (m^3).

A partir da relação entre a densidade do solo (Ds) e a densidade de partículas (Dp), adotando-se o valor de 2,65 g cm^{-3}, conforme Moura, Vieira e Carvalho (1992), foram obtidos os dados de porosidade total, conforme o equacionamento.

$$Pt = 1 - \frac{Ds}{Dp}$$

Onde: Pt é a porosidade total ($cm^3\ cm^{-3}$), Ds é a densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$), Dp é a densidade de partículas (2,65 $Mg\ m^{-3}$).

A umidade gravimétrica foi determinada segundo o método da estufa. A relação estabelece a massa de solo em condições naturais e depois de 24 horas em estufa a 105ºC (Embrapa, 2017). Equacionamento utilizado:

$$Ug = \frac{Msu - Mss}{Mss}$$

Onde: Ug é a umidade gravimétrica ($g\ g^{-1}$), Msu é a massa de solo úmido (g), e Mss é a massa de solo seco (g).

A resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) foi determinada utilizando-se um penetrômetro digital (PenetroLOG – PLG 1020) operado de forma estática, mensurada pela penetração da haste de ponta cônica do equipamento contra o solo, ao longo da profundidade de 60 cm, adjacente a cada um dos 72 pontos coletados.

A velocidade de infiltração básica (VIB) foi determinada pelo método do duplo anel concêntrico (Bernardo et al., 2006), utilizando dois anéis de aço (25 cm e 50 cm de diâmetro) inseridos 15 cm no solo. Após o preenchimento com água, mediu-se a infiltração no anel interno em intervalos regulares de tempo. Os dados de três repetições foram usados para calcular a VIB.

Análise Estatística

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial. Os atributos físicos do solo foram submetidos à análise de variância pelo modelo linear misto, considerando a profundidade do solo como efeito fixo e os pontos de coleta como efeito aleatório, visando considerar a dependência entre amostras oriundas do mesmo perfil. Ainda, estatísticas descritivas foram realizadas incluindo a média aritmética e coeficiente de variação, utilizados para conduzir uma análise de componentes principais (PCA). A PCA foi usada para reduzir o conjunto de dados destas variáveis, além de evitar multicolinearidade entre os dados originais, a fim de buscar entender a maior parte da variação presente nestas variáveis. Toda a análise foi conduzida utilizando a versão 4.5.2 do Software R Studio.

Resultados e Discussão

Após os procedimentos realizados para a quantificação de textura do solo, foram constatados valores de 341 $g\ kg^{-1}$ de argila, 265 $g\ kg^{-1}$ de areia e 394 $g\ kg^{-1}$ de silte na área do parque e que, de acordo com a classificação pelo triângulo textural, apresenta textura franco argilosa. Não houve diferença estatística significativa para nenhuma variável avaliada entre as três profundidades. Os coeficientes de variação foram utilizados para a verificação do quanto os dados variam em relação à média, sendo considerados altos (C.V. > 60,1%), segundo classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), conforme presentes na tabela 1.

Profundidade (m)	Ds ($Mg\ m^{-3}$)	Pt ($cm^3\ cm^{-3}$)	RMSP (MPa)	Ug ($g\ g^{-1}$)
0,0-0,2	1.29 ± 0.16 a	0.51 ± 0.06 a	0.691 ± 0.24 a	0.25 ± 0.10 a
0,2-0,4	1.36 ± 0.18 a	0.49 ± 0.07 a	0.682 ± 0.26 a	0.26 ± 0.16 a
0,4-0,6	1.35 ± 0.18 a	0.49 ± 0.07 a	0.760 ± 0.38 a	0.24 ± 0.10 a
CV (%)	13.06	13.21	40.76	18.50

Tabela 1: Resumo da análise de variância e comparação de médias para os atributos físicos do solo para as profundidades avaliadas. Médias de mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey (p < 0,05). Fonte: Próprios autores (2026)

A densidade do solo é um importante indicador de compactação e qualidade do solo. A maior média desta variável foi na profundidade de 0,2–0,4 m (1,36 $Mg\ m^{-3}$), e a menor na camada de 0-0,2 m (1,29 $Mg\ m^{-3}$). Suzuki et al. (2022), ao avaliarem atributos físicos do solo para latossolos com diferentes texturas, consideram-se críticos valores de densidade do solo superiores a 1,4 $Mg\ m^{-3}$ para solos que apresentam textura variando de argilosa a muito argilosa. Nota-se que as médias permaneceram abaixo deste limite, indicando condições físicas adequadas para infiltração de água e desenvolvimento radicular. Isto se deve ao fato da ausência de intensas atividades que oferecem riscos de impactos negativos, como pastejo e trânsito de maquinários agrícolas. Resultados semelhantes foram constatados por Araújo et al. (2022), ao avaliarem os atributos físicos do solo em área de Latossolo sob floresta, destacaram que a densidade do solo nestes locais é menor devido à ausência de atividades antrópicas de alto impacto, preservando suas condições originais. O coeficiente de variação foi de 13,2%, caracterizando baixa variabilidade para densidade do solo no experimento.

Na camada de 0-0,2 m tem-se a maior média de porosidade total (0,51 $cm^3\ cm^{-3}$) mantendo-se o mesmo valor para as outras duas camadas (0,49 $cm^3\ cm^{-3}$). De acordo com Lardy et al. (2022), o solo é considerado ideal quanto à porosidade total, quando aprdiveresenta cerca de 0,5 $cm^3\ cm^{-3}$, distribuídos em 0,33 $cm^3\ cm^{-3}$ de microporosidade, espaço responsável pelo armazenamento e retenção de água que fica disponível para as plantas, e 0,17 $cm^3\ cm^{-3}$ de macroporosidade, espaço onde ocorre a aeração e percolação da solução do solo ao longo do perfil e, portanto, verifica-se que os valores deste atributo se encontram dentro deste ideal estabelecido. O maior número de poros situa-se na camada em que houve menor densidade do solo que,

segundo Robinson et al. (2025), são inversamente proporcionais, ou seja, onde houver uma densidade mais elevada, consequentemente haverá menor distribuição de poros. Do ponto de vista ambiental, os poros são propriedades do solo passíveis de serem utilizados no diagnóstico de compactação, sendo inexistentes ou pouco evidentes quando há presença de solo compactado (Thomas et al., 2024). Rabot et al. (2018) em seus estudos, mostram que solos de textura argilosa a muito-argilosa em áreas protegidas possuem complexos orgânicos-minerais coesivos, levando a redes de poros maiores e menos suscetíveis à compactação, sendo estes fatos evidentes na área desta pesquisa, por apresentar solos com estas características. O C.V. desta variável foi 13,2%, indicando baixa variabilidade no experimento.

Diagnosticou-se maior resistência mecânica do solo à penetração na última camada de solo (0,4-0,6 m) com 0,760 MPa, enquanto a menor (0,682 MPa) na camada de 0,2-0,4 m. A RMSP é um dos principais indicadores da condição física do solo, utilizado para avaliar o grau de compactação. De acordo com Suzuki et al. (2024), valores acima de 2,0 MPa são considerados críticos para a infiltração de água no solo, aumentando o escoamento superficial, desencadeando processos erosivos e dificultando o desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Valores inferiores a estes foram encontrados nesta pesquisa, semelhante às avaliações dos atributos físicos do solo de jardins urbanos e parques realizadas por Paradelo et al. (2025), mencionando que estes valores estão dentro da faixa indicada para estes locais (Gregory et al., 2006). Maiores valores de RMSP em subsuperfície foram relatados por Pedron et al. (2004), possivelmente devido à presença de materiais grosseiros com granulometria diversa trazidos de outro local, comumente ocorrido em parques urbanos revitalizados, e não por compactação do solo propriamente dita, atrelando-se à explicação do elevado valor do C.V. (40,76%) no experimento. A relação entre RMSP e o teor de água é paralela. De acordo com Abedin et al. (2026), o aumento da umidade do solo promove redução significativa da resistência mecânica, uma vez que a água atua como um agente lubrificante entre as partículas do solo, reduzindo o atrito interno e aumentando a plasticidade do material. No entanto, os valores de umidade gravimétrica não se encontram elevados nas três camadas avaliadas (0,25, 0,26 e 0,24 g g^{-1}, respectivamente), reforçando a explicação para a maior RMSP detectada na última camada avaliada, com C.V. de 18,5%. Os valores de VIB encontrados na área descrevem o tempo necessário para uma infiltração de água constante no solo e estão na tabela 2.

Ensaio	VIB (mm h^{-1})
1	18
2	24
3	26
Média	23

Tabela 2: Resultados de VIB dos ensaios observados em campo
Fonte: Próprios autores (2026)

Após a estabilização da infiltração em cada ensaio, observou-se redução da taxa ao longo do tempo até atingir um valor constante, correspondente à VIB, estimada a partir das medições finais. A VIB média foi de 23 mm h^{-1}, sendo classificada como adequada segundo Bernardo et al. (2006), indicando boa capacidade de infiltração do solo.

Embora a análise de variância permita avaliar o comportamento isolado de cada atributo físico do solo, a dinâmica estrutural do solo resulta da interação simultânea entre essas variáveis. Nesse contexto, abordagens multivariadas tornam-se relevantes por possibilitarem a análise integrada dos atributos, identificando padrões de associação e gradientes estruturais que não são facilmente percebidos por análises univariadas. Assim, a avaliação conjunta de densidade do solo, porosidade total, resistência mecânica à penetração e umidade gravimétrica por meio de uma análise multivariada, contribui para uma compreensão mais abrangente dos atributos. O PCA foi realizado usando o software R Studio (ver 4.5.2). O PCA é uma técnica estatística que remodela os dados agregados em um conjunto de dimensões ortogonais, conhecidas como componentes principais (PC). O primeiro componente (Dm1) representa a maior quantidade de variância nos dados coletados, seguido pelo segundo componente (Dm2), conforme presente na figura 2. Os resultados mostram que os dois PCAs explicam 92,5% da variância total. A primeira dimensão (Dim1), com 72,5% da variância, descreve predominantemente a presença de compactação de acordo com a estrutura porosa do solo, sendo possível observar um antagonismo clássico e estatisticamente forte entre a densidade do solo (Ds) e a porosidade total (Pt), onde os vetores apontam em direções opostas, confirmando que o incremento da massa por unidade de volume reduz diretamente o espaço poroso disponível. Em ambientes urbanos, segundo Njavinezhad et al. (2025), essa relação mostra o estado de conservação do solo, variando entre condições mais preservadas devido ao maior número de poros, e condições mais degradadas, como maior densidade do solo. Esse elevado percentual de explicação demonstra forte organização estrutural dos atributos analisados, indicando que poucos processos ambientais dominam a dinâmica física do solo na área estudada, confirmando a relação clássica em que o aumento da densidade promove redução do volume de poros. Esse comportamento reflete, ainda, alterações estruturais associadas ao rearranjo das partículas do solo e à diminuição dos macroporos, fatores que influenciam processos hidrológicos importantes, como infiltração de água e aeração. Adicionalmente, o vetor da resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) alinha-se à densidade e opõe-se à Pt, evidenciando relação inversa, ou seja, quanto menor quantidade de poros, maior RMSP. Outros fatores são responsáveis em validar às condições de resistência do solo à penetração, como o teor de água durante a aferição realizada e agregação estrutural. A segunda dimensão (Dim2), responsável por 18,7% da variação, está associada à dinâmica hídrica, representada pela umidade gravimétrica (Ug). O fato de o vetor da umidade ser quase perpendicular ao da densidade sugere que a variação do teor de água ocorreu de forma relativamente independente, pois nota-se uma oposição vertical entre a umidade e a resistência à penetração, o que reflete o comportamento

físico real onde o aumento da água no solo atua como um "lubrificante", reduzindo a coesão entre as partículas e, consequentemente, a resistência mecânica, mesmo sob condições de densidade constante (Nero; Anning, 2018). A análise das elipses de confiança associadas às profundidades avaliadas, demonstrou elevada sobreposição entre as camadas, indicando ausência de separação multivariada consistente entre elas, complementando as análises uni variadas previamente obtidas, onde não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre as profundidades. Do ponto de vista ambiental, esse comportamento sugere relativa homogeneidade estrutural ao longo do perfil avaliado, possivelmente decorrente da estabilidade do sistema e da ausência de revolvimento mecânico recente, intenso e constante, característica comum em áreas verdes consolidadas sob manejo contínuo (Zhang et al., 2019).

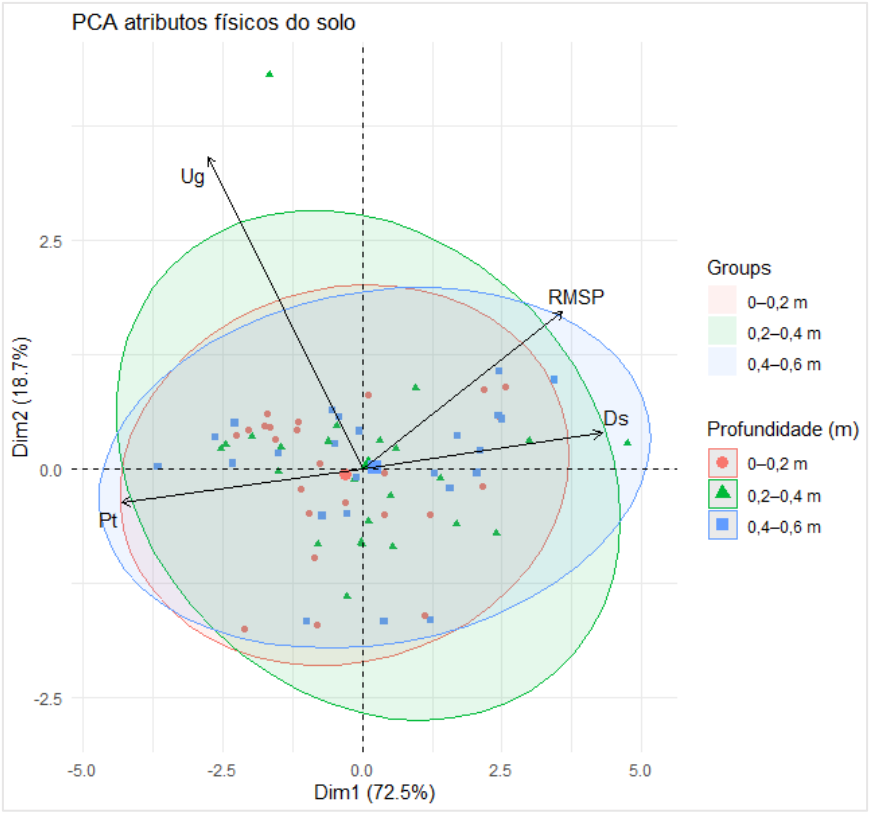


Figura 2: PCA atributos físicos do solo elaborado no Software R Studio
Fonte: Autores (2026)

Conclusão e considerações finais

Os atributos físicos do solo indicam boa qualidade estrutural, sem evidências de compactação e com homogeneidade ao longo do perfil. A infiltração adequada reforça a eficiência hidrológica do sistema. Os resultados confirmam o potencial desses atributos como indicadores no monitoramento ambiental de áreas verdes urbanas.

Agradecimentos

À Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul pela concessão da bolsa de iniciação científica, fundamental para a realização e desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

Abedin, M. Z., Islam, S., & Rahman, M. Z. (2026). Prediction of cone penetration resistance in unsaturated agricultural soils using neural networks. *Discover Soil, 3*, 13. https://doi.org/10.1007/s44378-026-00171-7

Araujo, W. O., Alvares, A. E. S., Emerick, H. F., Cruz, S. N., Oliveira, M. V., Silva, C. D. T., Almeida, W. S., Campos, M. C. C., Freitas, L., & Oliveira, I. A. (2022). Impactos na variabilidade espacial da densidade e porosidade do solo em função da transformação de floresta em pastagem no Vale do Jamari, Rondônia. *Research, Society and Development, 11*(15), e284111537170. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i15.37170

Auler, A. C., & Vieira, M. L. (2017). Coleta de amostras indeformadas de solo: Avaliação e proposta de equipamento. *Unoesc & Ciência, 8*(1), 41–44.

Bertoni, J., & Lombardi Neto, F. (2012). *Conservação do solo* (8ª ed.). Ícone.

Campos, R. F. F., Reichardt, L. G., Blauth, R., de Lima, C. F., Maté, C., Hulse, L., & Siegloch, A. E. (2025). Análise do uso do solo na Área de Preservação Permanente (APP) do perímetro urbano do município de Videira, Santa Catarina, Brasil. *Revista de Geopolítica, 16*(5), e1014. https://doi.org/10.56238/revgeov16n5-182

Gregory, J. H., Dukes, M. D., Jones, P. H., & Miller, G. L. (2006). Effect of urban soil compaction on infiltration rate. *Journal of Soil and Water Conservation, 61*(3), 117–124.

Kabisch, N., Qureshi, S., & Haase, D. (2015). Human–environment interactions in urban green spaces—A systematic review of contemporary issues and prospects for future research. *Environmental Impact Assessment Review, 50*, 25–34.

Lardy, J. M., DeSutter, T. M., Daigh, A. L. M., Meehan, M. A., & Staricka, J. A. (2022). Soil bulk density and water content effects on penetration resistance. *Agricultural & Environmental Letters, 7*, e20096. https://doi.org/10.1002/ael2.20096

Moura, E. G., Vieira, S. R., & Carvalho, A. M. (1992). Avaliação da capacidade de aeração e de água disponível dos solos de duas transeções na baixada ocidental maranhense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, 16*(1), 7–18.

Nero, B. F., & Anning, A. K. (2018). Variations in soil characteristics among urban green spaces in Kumasi, Ghana. *Environmental Earth Sciences, 77*, 317. https://doi.org/10.1007/s12665-018-7441-3

Njavinezhad, S. M., Naghibi, S. J., Shirazi, M. P., Baghernejad, M., Fernández-Raga, M., & Rodrigo-Comino, J. (2025). From fields to cities: Innovating assessment of soil quality in southern Iran's urban areas. *PLoS One, 20*(5), e0321312. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0321312

Paradelo, R., Herbón, C., & Barral, M. T. (2025). Physical properties of urban soils in Santiago de Compostela (Spain). *Journal of Soils and Sediments, 25*, 462–471. https://doi.org/10.1007/s11368-024-03833-7

Pedron, F. de A., Dalmolin, R. S. D., Azevedo, A. C. de, & Kaminski, J. (2004). Solos urbanos. *Ciência Rural, 34*(5), 1647–1653.

Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma, 314*, 122–137.

Robinson, D. A., Friedman, S. P., Thomas, A., Hirmas, D., Sullivan, P. L., & Nemes, A. (2025). Soil bulk density and porosity connecting macro- and micro-scales through geometry. *Earth-Science Reviews, 268*, 105173. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2025.105173

Rosa, D. W. B., Hot, C. V. P. S., Gomes, I. T., Ventura, D. F., Silva, T. F. G., Chong, J., Giurco, D., & Nascimento, N. O. (2024). Water quality benefits of implementing Green and Blue Infrastructure in a peri-urban catchment – Case study of a Brazilian metropolis. *Journal of Cleaner Production, 478*, 143943. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143943

Souza, F. L. (2016). *Centro de educação ambiental no Parque Arnulpho Fioravante, promovendo sua proteção e conservação* (Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Grande Dourados). https://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/bitstream/prefix/3337/1/FabioLemesdeSouza.pdf

Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Alves, M. C., & Reichert, J. M. (2022). Critical limits for soybean and black bean root growth based on macroporosity and penetrability for soils with distinct texture and management systems. *Sustainability, 14*(5), 2958. https://doi.org/10.3390/su14052958

Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Pillon, C. N., & Reichert, J. M. (2024). Mechanical resistance to penetration for improved diagnosis of soil compaction at grazing and forest sites. *Forests, 15*, 1369. https://doi.org/10.3390/f15081369

Thomas, A., Seaton, F., Dhiedt, E., Cosby, B. J., Feeney, C., Lebron, I., Maskell, L., Wood, C., Reinsch, S., Emmett, B. A., & Robinson, D. A. (2024). Topsoil porosity prediction across habitats at large scales using environmental variables. *Science of the Total Environment, 922*, 171158. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171158

Zhang, J., Li, S., Sun, X., Tong, J., Fu, Z., & Li, J. (2019). Sustainability of urban soil management: Analysis of physicochemical properties and bacterial community structure under different green space types. *Sustainability, 11*(5), 1395. https://doi.org/10.3390/su11051395.

MODELAGEM HIDRO-TOPOGRÁFICA E CAPACIDADE ADAPTATIVA: SUBSÍDIOS AO ORDENAMENTO DA EXPANSÃO URBANA NA ZEU DE ITAPEVI (SP)

1 Letícia Santos de Alencar, 2 Roberto Braga

1 Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Departamento de Geografia e Planejamento Ambiental, e-mail: leticia.alencar@unesp.br; 2 Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Departamento de Geografia e Planejamento Ambiental, e-mail: roberto.braga@unesp.br

Palavras-chave: Geotecnologias; Sensibilidade Hidrológica; Adaptação Climática.

Resumo

A expansão urbana em municípios periféricos da Região Metropolitana de São Paulo tem ocorrido, frequentemente, sem a adequada consideração das condicionantes físico-ambientais, ampliando a vulnerabilidade a eventos hidrológicos extremos. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo analisar a sensibilidade a inundações, alagamentos e enchentes na Zona de Expansão Urbana (ZEU) de Itapevi (SP), visando subsidiar o planejamento urbano sob a perspectiva da adaptação climática. A metodologia baseou-se na análise de variáveis geomorfológicas e hidrológicas — declividade, Índice Topográfico de Umidade (TWI), curvatura em plano e litologia — em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), com uso de *softwares* de código aberto. Os resultados evidenciam elevada sensibilidade hidrológica em extensas porções da ZEU, especialmente em áreas de baixa declividade e alta convergência de fluxo, indicando propensão ao acúmulo hídrico e à ocorrência de alagamentos. Observa-se, ainda, que a urbanização futura da área tende a intensificar a sobrecarga do sistema de drenagem das zonas urbanas consolidadas situadas a jusante. Nesse sentido, destaca-se a necessidade de incorporar critérios físico-ambientais ao ordenamento territorial, bem como estratégias baseadas em Infraestrutura Verde-Azul e Soluções baseadas na Natureza, capazes de promover retenção e infiltração hídrica. A abordagem proposta apresenta caráter replicável e contribui para o desenvolvimento de instrumentos de planejamento urbano orientados à resiliência climática em áreas de expansão urbana.

Introdução

O município de Itapevi, localizado na zona oeste da Região Metropolitana de São Paulo, integra a Bacia do Alto Tietê – UGRHI 5, possuindo área territorial de 82,658 km² e população residente de 232.297 habitantes (IBGE, 2022). De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, a região apresenta clima do tipo Cfa, caracterizado como subtropical úmido, com precipitações distribuídas ao longo do ano e ausência de estação seca definida (KOTTEK *et al*., 2006). Nesse contexto, destaca-se a Zona de Expansão Urbana (ZEU), com área de 13,31 km², situada a cerca de 2 km do centro urbano consolidado e destinada, segundo o Plano Diretor Participativo, à acomodação do crescimento urbano por meio da diversificação de usos do solo e ampliação da infraestrutura (ITAPEVI, 2021). A área apresenta rede de drenagem relativamente densa, com presença de cursos intermitentes, além de condições geomorfológicas e pedológicas associadas a relevo ondulado e solos argilosos, características que influenciam diretamente a dinâmica hidrológica local.

As diretrizes que orientam a designação de zonas de expansão urbana em planos diretores frequentemente negligenciam as fragilidades ambientais do território, contribuindo para a consolidação de conflitos de uso da terra em áreas suscetíveis a riscos e intensificando processos de degradação dos recursos naturais. Em um contexto de mudanças climáticas, a combinação entre padrões de urbanização não sustentáveis e a ocupação de áreas ambientalmente sensíveis potencializa a ocorrência de eventos extremos, como inundações e alagamentos, afetando de forma desproporcional populações vulneráveis (IPCC, 2022). Embora o arcabouço normativo brasileiro estabeleça instrumentos para o ordenamento territorial, como a Política Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 1981) e o Estatuto da Cidade (BRASIL, 2001), a efetividade dessas diretrizes é limitada pela fragmentação institucional e pela dificuldade de integração entre planejamento urbano e ambiental (VEIGA, 2006; MARICATO, 2011; MACHADO, 2023).

Do ponto de vista teórico, o planejamento urbano ambiental demanda a incorporação de atributos físicos e ecológicos — como relevo, drenagem, solos e cobertura vegetal — no processo de tomada de decisão sobre o uso do solo (MCHARG, 1969; SPIRN, 1984; FORMAN, 1995). Entretanto, a persistência de modelos de expansão urbana orientados por dinâmicas econômicas imediatistas tem resultado na ocupação de áreas suscetíveis a processos hidrológicos adversos, agravando a vulnerabilidade socioambiental (HARVEY, 2012). Em municípios periféricos de regiões metropolitanas, como Itapevi, essas dinâmicas são intensificadas pela pressão por urbanização rápida e pela limitada capacidade institucional de planejamento, evidenciando a necessidade de instrumentos que subsidiem decisões preventivas em áreas ainda não consolidadas.

Nesse contexto, o zoneamento ambiental constitui ferramenta estratégica para a identificação de potencialidades e restrições do território, podendo subsidiar o planejamento urbano sob a perspectiva da resiliência climática. No entanto, sua aplicação em escala municipal, especificamente na Zona de Expansão Urbana (ZEU), ainda apresenta lacunas metodológicas, sobretudo no que se refere à integração de indicadores geoespaciais e à consideração de cenários climáticos futuros. No caso da ZEU de Itapevi, embora classificada como área de média aptidão à urbanização, observa-se a ausência de detalhamento metodológico quanto aos critérios utilizados para essa definição, bem como a limitação de dados voltados à avaliação prospectiva de áreas ainda não ocupadas.

A análise da sensibilidade a desastres geo-hidrológicos demanda uma abordagem integrada, alinhada aos paradigmas contemporâneos das mudanças climáticas. Para tanto, este estudo fundamenta-se no *framework* de risco do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), operacionalizado no Brasil pela plataforma AdaptaBrasil, que compreende a vulnerabilidade como função da exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa (IPCC, 2001; BIRKMANN et al., 2013). Considerando o território como um sistema socioecológico (GALLOPÍN, 2006), a sensibilidade é interpretada como a resposta inerente do meio físico às condições climáticas, associada a atributos como declividade, dinâmica de escoamento superficial e características geológicas e pedológicas. Nesse sentido, o mapeamento da sensibilidade constitui etapa fundamental para a identificação de vulnerabilidades potenciais antes da consolidação da ocupação urbana, contribuindo para o fortalecimento da capacidade adaptativa municipal.

Diante disso, o presente estudo tem como objetivo analisar a sensibilidade a inundações, alagamentos e enchentes na Zona de Expansão Urbana de Itapevi (SP), por meio do estudo de variáveis geomorfológicas e hidrológicas em ambiente de geoprocessamento, visando subsidiar estratégias de planejamento urbano orientadas à adaptação climática em áreas ainda não consolidadas.

Material e Métodos

A área de estudo compreende a Zona de Expansão Urbana (ZEU) do município de Itapevi (SP), conforme delimitada pelo Plano Diretor Participativo (ITAPEVI, 2021). Para a análise, foram utilizados dados geoespaciais obtidos através do Portal Geopixel Cidades, incluindo camadas vetoriais de hidrografia, drenagem e zoneamento urbano, além de bases geológicas do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2006). O processamento foi realizado em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), por meio dos *softwares* QGIS e SAGA GIS.

A modelagem da sensibilidade a inundações, alagamentos e enchentes foi baseada na análise espacial de variáveis geomorfológicas e hidrológicas representativas da dinâmica do escoamento superficial, incluindo declividade, Índice Topográfico de Umidade (*Topographic Wetness Index* – TWI), curvatura em plano e litologia, esta última considerada como variável complementar de suporte à interpretação hidrológica. A seleção dessas variáveis fundamentou-se em modelos consolidados na literatura, sendo adaptada à escala de detalhe da área de estudo, na qual variáveis como precipitação e pedologia apresentam baixa variabilidade espacial e reduzida capacidade discriminatória (portanto, não aplicadas como critério de análise).

Para a derivação das variáveis morfométricas, foi gerado um Modelo Digital de Elevação (MDE) a partir da interpolação de curvas de nível, utilizando o método *Inverse Distance Weighting* (IDW). Este algoritmo se baseia no princípio da autocorrelação espacial, em que o valor de um ponto não amostrado é calculado através de uma média ponderada dos valores dos pontos vizinhos, de maneira que o peso atribuído a cada ponto decresça à medida que a distância em relação ao ponto de interesse aumenta (BURROUGH; McDONNELL, 1998). A resolução espacial adotada foi de 15 metros, visando compatibilizar o detalhamento cartográfico com parâmetros urbanísticos e ambientais aplicáveis à escala local. O MDE foi submetido à correção hidrológica por meio do algoritmo *Fill Sinks*, garantindo a continuidade do escoamento superficial e a consistência dos produtos derivados (WANG & LIU, 2006).

A declividade foi calculada a partir do MDE corrigido, sendo interpretada como um dos principais controladores da dinâmica hidrológica. Em áreas de baixa declividade, a redução do gradiente hidráulico favorece o acúmulo de água, aumentando a propensão à ocorrência de alagamentos e inundações. Após a geração do mapa temático, procedeu-se à correlação entre os valores de declividade e os registros históricos de ocorrências no município, permitindo a definição dos intervalos de sensibilidade, que evidenciaram maior concentração de eventos em faixas de relevo plano a suavemente ondulado.

O Índice Topográfico de Umidade (TWI) foi calculado a partir da área de contribuição específica e da declividade, conforme a formulação clássica de Beven e Kirkby (1979). Esse índice foi utilizado para identificar zonas potenciais de saturação hídrica, sendo calibrado com base em análise estatística de eventos históricos registrados pela Defesa Civil municipal. A partir da correlação entre os valores do índice e os pontos de ocorrência, foram definidos limiares de sensibilidade, cujos resultados indicaram que valores elevados de TWI estão diretamente associados à recorrência de alagamentos, permitindo a distinção entre áreas de baixa, média e alta criticidade hídrica.

A curvatura em plano foi empregada para representar a convergência e divergência lateral do fluxo superficial. A derivação foi realizada a partir do MDE, permitindo identificar zonas de concentração de escoamento associadas à formação de áreas suscetíveis à inundação. De modo análogo aos critérios anteriores, os intervalos de sensibilidade foram definidos com base na distribuição estatística dos registros históricos, com destaque para áreas de curvatura convergente e superfícies próximas à neutralidade geométrica, que apresentaram maior frequência de ocorrências.

Para os critérios de declividade, Índice Topográfico de Umidade (TWI) e curvatura em plano, foi aplicada uma etapa de reclassificação por tabela, com atribuição de valores em escala ordinal de 0 a 10, conforme os intervalos definidos para cada variável, em que 0 representa menor sensibilidade e 10 maior sensibilidade. Esse procedimento teve como objetivo padronizar a leitura dos diferentes critérios em uma mesma base comparativa, permitindo uma análise mais equivalente entre as variáveis. Adicionalmente, essa padronização visa facilitar a integração futura dos dados em análises multicritério, bem como sua aplicação por parte do poder público em instrumentos de planejamento territorial.

A litologia foi incorporada como variável categórica, considerando sua influência na permeabilidade, na capacidade de armazenamento hídrico e na geração de escoamento superficial. Neste estudo, optou-se por utilizar o mapa de unidades litológicas como base para análise complementar, sem reclassificação direta em níveis de sensibilidade, visando subsidiar a interpretação dos processos de infiltração e retenção hídrica no território.

O enquadramento conceitual da análise fundamenta-se no *framework* de risco do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que compreende a vulnerabilidade como função da exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa (IPCC, 2001; BIRKMANN *et al*., 2013), sendo a sensibilidade tratada, neste estudo, como a resposta intrínseca do meio físico às condições hidrológicas.

Resultados e Discussão

A análise espacial dos critérios geomorfológicos e hidrológicos evidencia um cenário de elevada sensibilidade a inundações, alagamentos e enchentes na ZEU de Itapevi. Diferentemente de padrões pontuais de instabilidade, a distribuição dos indicadores revela uma condição sistêmica, na qual extensas porções da área operam sob elevada criticidade hídrica, especialmente em setores centrais a noroeste.

A análise da declividade demonstra a predominância de áreas de baixo gradiente topográfico, particularmente em fundos de vale e superfícies suavemente onduladas, favorecendo o acúmulo de água superficial. Esses setores apresentam menor capacidade de escoamento, tornando-se naturalmente propensos à ocorrência de alagamentos, sobretudo quando associados à futura impermeabilização decorrente da expansão urbana. Esse padrão é reforçado pela distribuição espacial das ocorrências históricas no município, que se concentram majoritariamente em faixas de relevo plano a suavemente inclinado. A Figura 01 apresenta a declividade como indicador de sensibilidade a inundações, alagamentos e enchentes.

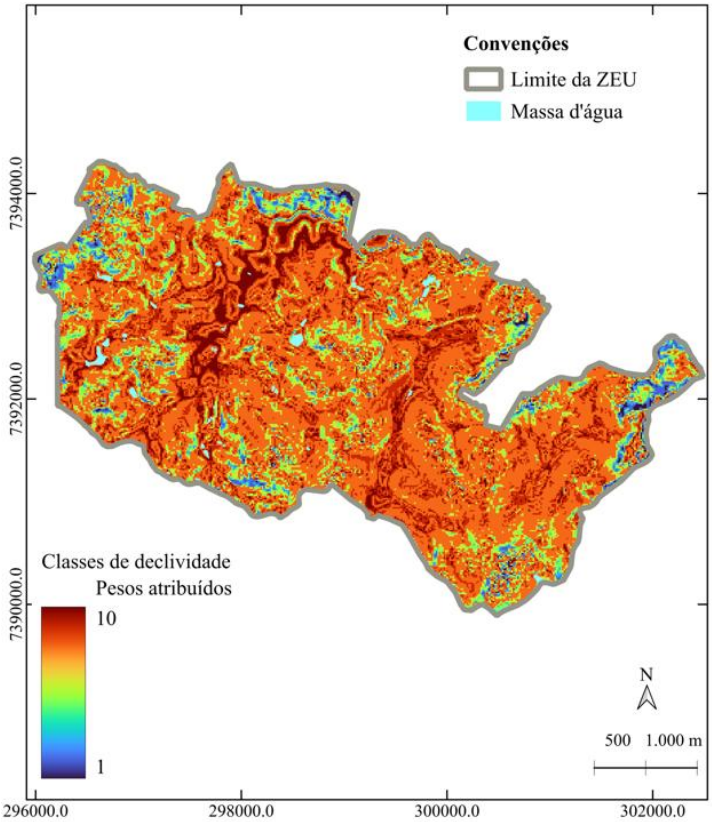


Figura 01: Mapa de Sensibilidade do Meio Físico: Declividade como Indicador de Sensibilidade a Inundações, Alagamentos e Enchentes.
Fonte: Elaboração própria, a partir do Mapa de Declividade, reclassificado por tabela em QGIS (2026)

O Índice Topográfico de Umidade (TWI) revela com maior precisão a conectividade hidrológica do território, destacando zonas de convergência de fluxo e potencial saturação hídrica. Observa-se que amplas áreas da ZEU apresentam valores elevados do índice, indicando tendência natural à retenção de água e formação de áreas críticas. A correspondência entre esses padrões e os registros históricos de alagamentos no município reforça o papel do TWI como indicador fundamental da sensibilidade hidrológica local, ao evidenciar não apenas áreas de acúmulo superficial, mas também a dinâmica de saturação do solo. A Figura 02 apresenta o TWI como indicador de potencial de saturação hídrica. Mais uma vez, fica evidente que setores centrais da porção noroeste da ZEU demonstram maior sensibilidade a inundações.

A análise da curvatura em plano complementa essa interpretação ao evidenciar os padrões de convergência lateral do escoamento. Setores com curvatura convergente e áreas próximas à neutralidade geométrica concentram a maior parte das ocorrências registradas, indicando que a morfologia do terreno exerce controle direto sobre a distribuição espacial dos eventos. Nessas áreas, a combinação entre baixa declividade e convergência de fluxo cria condições favoráveis ao acúmulo hídrico, configurando zonas críticas de inundação. A Figura 03 apresenta a curvatura em plano como indicador de convergência e divergência de fluxo.

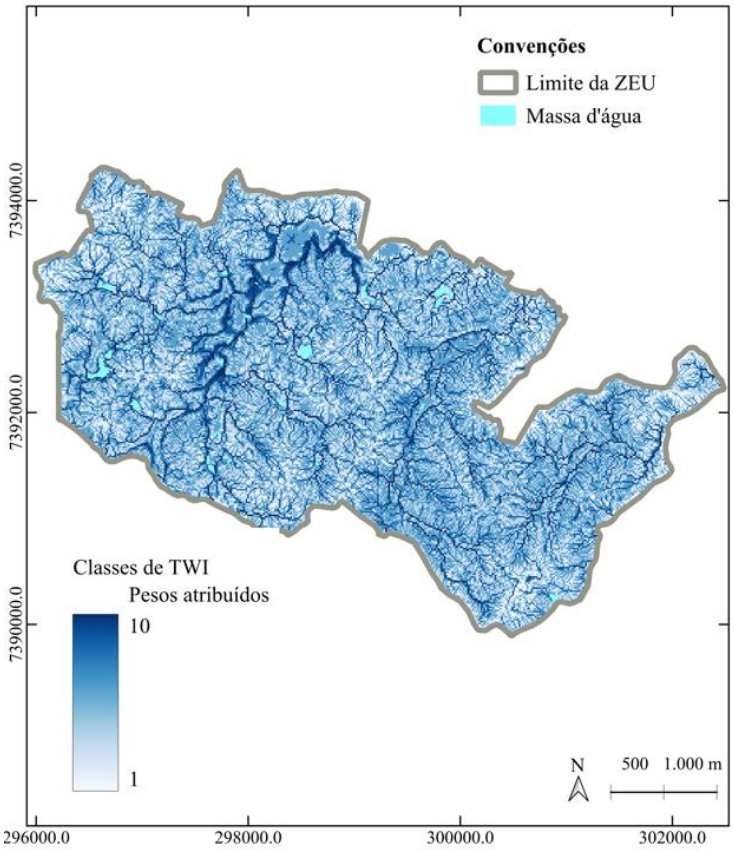


Figura 02: Mapa de Sensibilidade do Meio Físico: TWI como Indicador do Potencial de Saturação Hídrica.
Fonte: Elaboração própria, a partir do Mapa de TWI, reclassificado por tabela em QGIS (2026)

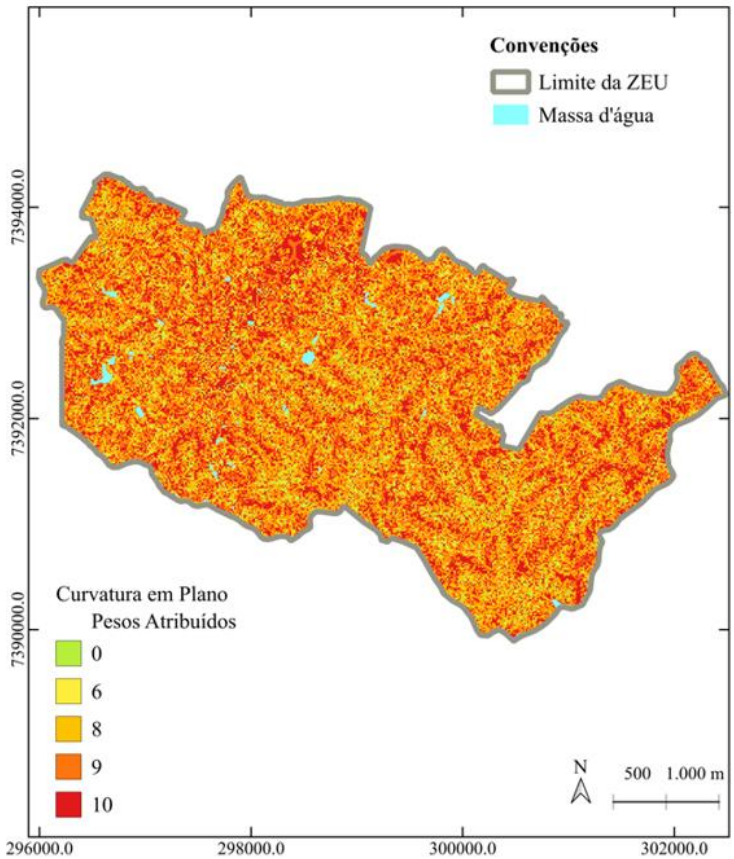


Figura 03: Mapa de Sensibilidade do Meio Físico: Curvatura em Plano como Indicador de Convergência e Divergência de Fluxo.
Fonte: Elaboração própria, a partir do Mapa de Curvatura em Plano, reclassificado por tabela em QGIS (2026)

A análise desses critérios, conjuntamente, evidencia que a sensibilidade a eventos hidrológicos na ZEU não se restringe a áreas isoladas, mas configura um sistema contínuo de produção e concentração de escoamento superficial. A água converge nas vertentes e se acumula nas zonas de menor energia, especialmente fundos de vale e áreas planas, onde a capacidade de drenagem é limitada. As áreas de maior criticidade quanto à convergência de fluxos, embora mais bem distribuída ao longo da ZEU e, portanto, menos contrastante visualmente, também indicam ligeira predominância na porção central-noroeste da ZEU.

O cenário observado torna-se ainda mais crítico quando analisado em escala municipal. A ZEU localiza-se a montante da Zona Urbana Consolidada (ZUC), onde se concentram áreas densamente ocupadas e com elevada impermeabilização do solo. A urbanização progressiva da ZEU tende a aumentar o volume e a velocidade do escoamento superficial direcionado a jusante, ampliando a sobrecarga do sistema de drenagem existente e intensificando a ocorrência de eventos hidrológicos extremos nas áreas já consolidadas.

A ausência de instrumentos estruturantes, como um Plano Municipal de Drenagem Urbana, agrava esse cenário, limitando a capacidade adaptativa do município frente às mudanças climáticas. Historicamente, as intervenções adotadas têm se baseado em soluções estruturais convencionais, como canalizações e reservatórios de retenção, que, embora pontualmente eficazes, não abordam a dinâmica integrada da bacia hidrográfica e podem transferir os impactos para áreas a jusante.

Nesse contexto, os resultados evidenciam a necessidade de incorporação de abordagens baseadas na infraestrutura verde e azul, capazes de atuar na retenção, infiltração e desaceleração do escoamento superficial. A modelagem da sensibilidade apresentada neste estudo demonstra que a consideração dos condicionantes físicos do território é fundamental para o planejamento da expansão urbana, permitindo antecipar áreas críticas antes da consolidação da ocupação.

Por fim, destaca-se que, embora a litologia influencie a resposta hidrológica do terreno, sua contribuição para a diferenciação espacial da sensibilidade mostrou-se secundária frente às variáveis morfométricas, especialmente em um cenário de urbanização máxima: a predominância de solos com baixa condutividade hidráulica e a tendência à impermeabilização reduzem a influência do substrato geológico, reforçando o papel do relevo e da dinâmica de escoamento superficial como principais condicionantes da sensibilidade a inundações na ZEU de Itapevi. Nesse sentido, o mapa litológico é apresentado como complemento à análise, contribuindo para a identificação de áreas prioritárias à implementação de Infraestrutura Verde-Azul, sobretudo em setores onde as características do substrato favorecem a infiltração e o armazenamento hídrico. Na Figura 04, apresenta-se o mapa de unidades litológicas da ZEU de Itapevi (SP), utilizado como base para a análise complementar da dinâmica hidrológica.

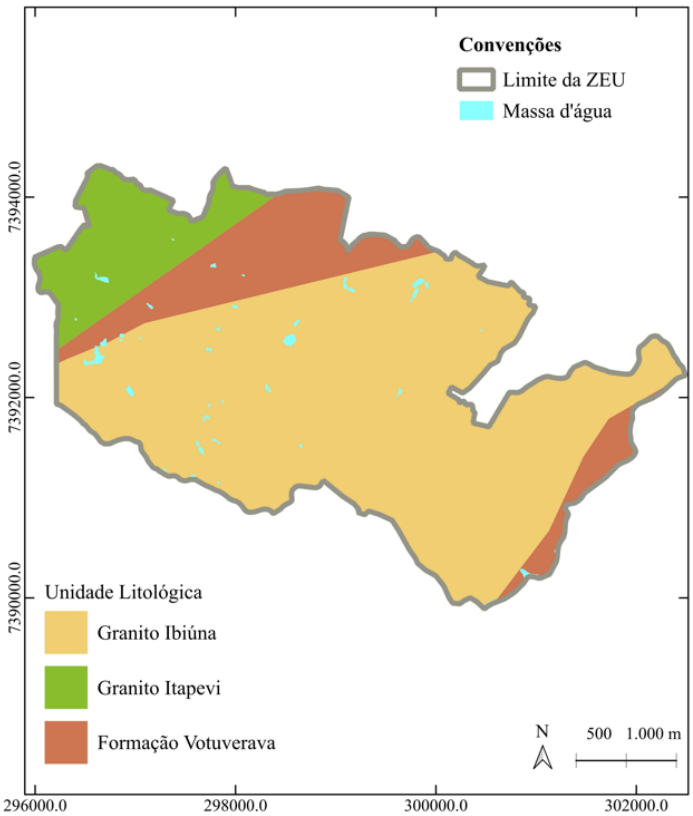


Figura 04: Unidades litológicas e potencial de suporte à infraestrutura verde-azul na ZEU de Itapevi (SP)
Fonte: Elaboração própria, com dados de CPRM (2006) obtidos via plataforma DataGEO (2026)

Assim, a litologia é mantida no modelo como um condicionante de "estado natural", essencial para identificar a fragilidade intrínseca do terreno em áreas onde a expansão urbana ainda não consolidou a completa alteração do ciclo hidrológico. Nesse sentido, embora sua contribuição para a diferenciação espacial da sensibilidade seja secundária frente às variáveis morfométricas, a análise litológica assume papel estratégico na orientação de intervenções territoriais. Observa-se que

setores associados ao Granito Ibiúna apresentam, em termos relativos, maior potencial de infiltração e armazenamento hídrico, quando comparados às áreas dominadas pela Formação Votuverava e ao Granito Itapevi. Essa característica está relacionada à maior espessura do manto de alteração e à maior porosidade do material saprolítico, ainda que condicionada pelas propriedades pedológicas locais.

Sob essa perspectiva, tais áreas configuram-se como prioritárias para a implementação de Infraestrutura Verde-Azul, especialmente em tipologias como parques urbanos, áreas de infiltração e dispositivos de retenção hídrica, atuando como zonas de amortecimento do escoamento superficial. Por outro lado, áreas situadas na interface entre o Granito Ibiúna e a Formação Votuverava — notadamente na porção centro-noroeste da ZEU — concentram maior sensibilidade hidrológica, em função da menor condutividade hidráulica relativa e da resposta mais rápida à saturação, demandando maior cautela no processo de ocupação e a adoção de estratégias voltadas ao retardamento do escoamento superficial.

Adicionalmente, a análise integrada evidencia que as áreas de maior sensibilidade coincidem, em grande medida, com a extensão das calhas fluviais e suas zonas adjacentes, reforçando a importância da preservação e recuperação das Áreas de Preservação Permanente (APPs). A manutenção dessas faixas vegetadas desempenha papel fundamental na regulação do ciclo hidrológico, atuando na infiltração, retenção e dissipação da energia do escoamento, além de reduzir a vulnerabilidade a eventos de inundação.

Dessa forma, a articulação entre condicionantes litológicos, morfométricos e legais permite não apenas compreender a dinâmica de sensibilidade do território, mas também subsidiar diretrizes concretas de planejamento urbano, orientadas à implementação de Soluções baseadas na Natureza e ao fortalecimento da resiliência hidrológica da ZEU de Itapevi.

Conclusões

Os resultados obtidos evidenciam que a Zona de Expansão Urbana de Itapevi apresenta elevada sensibilidade a inundações, alagamentos e enchentes, configurando um cenário em que a dinâmica hidrológica do terreno impõe restrições significativas ao processo de urbanização. A predominância de áreas com baixa declividade, associada à convergência de fluxos e elevados valores do Índice Topográfico de Umidade (TWI), indica que extensas porções da ZEU operam sob condições favoráveis ao acúmulo hídrico, potencializando a ocorrência de eventos extremos (sobretudo na porção centro-noroeste).

A abordagem metodológica adotada, baseada na integração de variáveis geomorfológicas e hidrológicas em ambiente de geoprocessamento, demonstrou ser eficaz na identificação de padrões espaciais de sensibilidade, mesmo em áreas ainda não consolidadas. O uso de dados acessíveis e ferramentas de código aberto reforça o caráter replicável da proposta, tornando-a aplicável a outros municípios com limitações técnicas e operacionais semelhantes.

A análise evidencia, ainda, que a expansão urbana da ZEU tende a intensificar a sobrecarga do sistema de drenagem das áreas situadas a jusante, especialmente na Zona Urbana Consolidada, onde a impermeabilização do solo já compromete a capacidade de infiltração e amplifica os efeitos do escoamento superficial. Esse cenário reforça a necessidade de incorporar critérios físico-ambientais no planejamento urbano, de modo a antecipar riscos e evitar a consolidação de passivos territoriais.

Nesse contexto, o zoneamento ambiental configura-se como instrumento estratégico para orientar o ordenamento territorial em áreas de expansão, permitindo a identificação prévia de limitações e potencialidades do meio físico. A incorporação de abordagens baseadas em infraestrutura verde e azul e soluções baseadas na natureza mostra-se fundamental para ampliar a capacidade adaptativa do município, contribuindo para a redução da vulnerabilidade socioambiental e para a promoção de maior resiliência frente às mudanças climáticas.

Por fim, destaca-se que a modelagem da sensibilidade constitui etapa preliminar para a integração de múltiplas dimensões da vulnerabilidade, incluindo aspectos institucionais e de gestão do risco. A continuidade desta abordagem, por meio da aplicação de métodos de análise multicritério, poderá subsidiar a elaboração de instrumentos mais robustos de planejamento urbano, contribuindo para a construção de cidades mais seguras, sustentáveis e alinhadas aos princípios da adaptação climática.

Comentários finais

Os resultados reforçam a importância de antecipar a dinâmica hidrológica no planejamento de áreas de expansão urbana, especialmente em municípios periféricos, onde as relações de desigualdade socioeconômica são mais agudas, impactam em menor capacidade de resposta frente a desastres e configuram cenário de injustiça climática. A incorporação de ferramentas geoespaciais acessíveis, aliadas a estratégias baseadas em Infraestrutura Verde-Azul e Soluções baseadas na Natureza, constitui caminho promissor para a promoção de cidades mais resilientes frente à emergência climática.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Estadual Paulista (UNESP) e à Secretaria de Meio Ambiente e Defesa dos Animais de Itapevi pelo apoio institucional e pela disponibilização de dados geoespaciais utilizados nesta pesquisa.

Referências Bibliográficas

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.

BIRKMANN, J.; CARDONA, O. D.; CARREÑO, M. L.; BARBAT, A. H.; PELLING, M.; SCHNEIDERBAUER, S.; KIENBERGER, S.; KEILER, M.; ALEXANDER, D.; ZEIL, P.; WELLE, T. Framing vulnerability, risk and societal

responses: the MOVE framework. Natural Hazards, [s. l.], v. 67, n. 1, p. 193-211, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0558-5.> Acesso em: 21 jan. 2026.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Institui a Política Nacional de Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 set. 1981.

BRASIL. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 11 jul. 2001. Seção 1, p. 1.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. Principles of Geographical Information Systems. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1998.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Geologia do Estado de São Paulo. Escala 1:750.000. Rio de Janeiro: CPRM, 2006. Disponível em: <https://datageo.ambiente.sp.gov.br/app/#>. Acesso em: 29 jan. 2025.

FORMAN, R. T. T. Land mosaics: the ecology of landscapes and regions. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

GALLOPÍN, G. C. Human dimensions of global change: linking the global and the local processes. International Social Science Journal, [s. l.], v. 130, p. 707–718, 1991.

HARVEY, D. Rebel cities: from the right to the city to the urban revolution. London: Verso, 2012.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2022: Resultados preliminares. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 29 jan. 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II Impacts adaptation and vulnerability, 2001.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability. Summary for policymakers. [S. l.]: IPCC, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>. Acesso em: 27 dez. 2024.

ITAPEVI. Lei Complementar nº 143, de 25 de agosto de 2021. Institui o Plano Diretor Participativo do Município de Itapevi e dá outras providências. Diário Oficial do Município de Itapevi, Itapevi, SP, 25 ago. 2021. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/plano-diretor-itapevi-sp>. Acesso em: 1 jan. 2025.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated. Meteorologische Zeitschrift, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006.

MACHADO, P. A. L. Direito ambiental brasileiro. 13. ed. São Paulo: Malheiros, 2005.

MARICATO, E. O impasse da política urbana no Brasil. Petrópolis: Vozes, 2011.

MCHARG, I. L. Design with nature. New York: Natural History Press, 1969.

SPIRN, A. W. The granite garden: urban nature and human design. New York: Basic Books, 1984.

VEIGA, J. E. Desenvolvimento sustentável: o desafio do século XXI. 1. ed. Rio de Janeiro: Garamond, 2006.

WANG, L.; LIU, H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. International Journal of Geographical Information Science, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 193–213, 2006.

MODELING CHANGES IN LAND USE AND COVER USING TRANSITION MATRICES IN AN AMAZONIAN BIOLOGICAL RESERVE

1 Davi Farias de Andrade da Silva, 2 Norma Ely Santos Beltrão, 3 Hélio Raymundo Ferreira Filho, 4 Lais Braga Vieira de Aragão, 5 Daniel Nascimento e Silva, 6 Ciro José Jardim de Figueiredo

1State University of Pará, e-mail:davifarias.rug@gmail.com; 2State University of Pará, e-mail: normaely@uepa.br; 3State University of Pará, e-mail: helio.ferreira@uepa.br; 4State University of Pará, e-mail: laisbraga@uepa.br; 5Federal Institute of Education, Science and Technology of Amazonas, e-mail: danielnss@gmail.com; 6Federal Rural University of the Semi-Arid Region, e-mail: ciro.figueiredo@ufersa.edu.br

Keywords: Biodiversity. Conservation. Deforestation.

Abstract

The Amazon continues to be threatened by increasing deforestation and burning for productive purposes, such as timber extraction and the expansion of agriculture and livestock farming. An example of this scenario can be found in the Gurupi Biological Reserve, one of the last forest fragments of the Amazon biome in the state of Maranhão. Thus, this study sought to investigate, both temporally and spatially, the dynamics of deforestation in the reserve and the resulting changes in land use and land cover, using data from the Brazilian Amazon Deforestation Monitoring Project (PRODES) and the MapBiomas project. Through subsequent data processing, analysis, and mapping, it was found that between 2005 and 2019, the Gurupi Biological Reserve experienced deforestation covering 212.413 km², with the portion corresponding to the municipality of Bom Jardim being the most affected. The main transition from forest to pasture, according to MapBiomas mapping.

Introduction

The Amazon (defined here as the Amazon basin) is home to the highest concentration of biodiversity on Earth, providing unique genetic resources and ecological functions that support ecosystem services globally. However, it remains threatened by ongoing land conversion and climate change. (LAPOLA et al., 2023; GUAYASAMIN et al., 2024).

Forest degradation refers to the long-term reduction in the total supply of forest benefits, including timber, biodiversity, and other products and services. In contrast, deforestation is the conversion of forests to other land uses, whether human-induced or not (FAO, 2022). In Amazonian ecosystems, fire is one of the main agents of degradation and is widely used for land cover conversion and management (CAPANEMA et al., 2018).

The Amazon Rainforest lacks the capacity to recover quickly after fires because it lacks adaptations to withstand fire (COPERTINO et al., 2019). However, the same authors also highlight that, since the 1960s, with the encouragement of intensive occupation in the region, deforestation rates have increased and land use and occupation have changed, altering the fire regime in the Amazon.

An example of this scenario can be found in the Belém Endemism Center (CEB), an Amazonian center of endemism whose territory is divided between the states of Pará and Maranhão. This is one of the richest regions in the Amazon. However, it is also one of the most threatened, as approximately 70% of its forests have already been cleared to make way for cities and low-productivity agriculture (CI, 2021).

Located within the CEB, in a portion of the state of Maranhão, is the Gurupi Biological Reserve (Rebio Gurupi), established by Federal Decree No. 95,614/1988, and is the only Federal Conservation Unit of Integral Protection (UCPI) in this center of endemism. There are environmental impacts in the area resulting from timber extraction within the reserve; since it is a UCPI, the direct use of its natural resources (mining, firewood extraction, etc.) is prohibited, except in cases provided for by law, such as scientific research (BARROS; BARBOSA, 2015).

This area protects a rich diversity of plants and animals, including more than 46 endemic and endangered species, four of which are critically endangered: the birds *Psophia obscura* and *Nyctibius leucopterus*, and the primates *Chiporotes satanas* and *Cebus kaapori*. Because of this, deforestation poses a series of disturbances to the endemic species of the Gurupi Biosphere Reserve, primarily due to changes in environmental characteristics caused by edge effects, which lead to local extinctions, reduce habitat availability, and contribute to reduced genetic variability. Furthermore, replacing natural vegetation cover with pasture or cultivated areas alters surface aerodynamic and radiative patterns, as well as the pattern of mass and energy exchange between the surface and the atmosphere, which are direct consequences of logging or the use and conversion of vegetation cover for agriculture and livestock. (HENTZ et al., 2015; PAVÃO et al., 2017; CELENTANO et al., 2018).

In Brazil, some projects use remote sensing data to observe the Earth's surface for various research purposes, notably the Brazilian Amazon Deforestation Monitoring Program (PRODES), which has monitored deforestation in the Amazon since 1988, and MapBiomas, created in 2015 to identify and quantify land use and land cover across the country's different biomes (INPE, 2021; MAPBIOMAS, 2021). Thus, it is possible to use and compare data from these projects to observe deforestation dynamics and the resulting changes in land use and land cover within a specific area of the Amazon biome.

For environmental monitoring and assessment to be reliable, high-quality land-use and land-cover maps are necessary. To assess the reliability of MapBiomas (collections 2 and 3), NEVES et al. (2020) compared their classifications using a pixel-by-pixel approach in an evaluation based on concordance matrices, yielding a result of 92% overall concordance for the Amazon biome, which can be used to identify areas for planting and restoration of native forest to create local corridors, analyze the fragmentation of remaining forest areas, and assess the environmental status of watersheds and the protection of water bodies (ROSA, 2016).

In light of the above, this article aims to investigate, from a temporal and spatial perspective, the dynamics of deforestation in the Gurupi Biosphere Reserve and the resulting changes in land use and land cover.

Materials and Methods

Study Area

Rebio Gurupi is a Strictly Protected Conservation Unit (UCPI) located in the Eastern Amazon, within the Belém Endemism Center, more specifically in the state of Maranhão. As shown in Figure 1, its territory is divided among three municipalities in Maranhão, covering 1,635.35 km² in Centro Novo do Maranhão, 960.823 km² in Bom Jardim, and 116.42 km² in São João do Carú, for a total of 2,712.59 km² for the reserve.

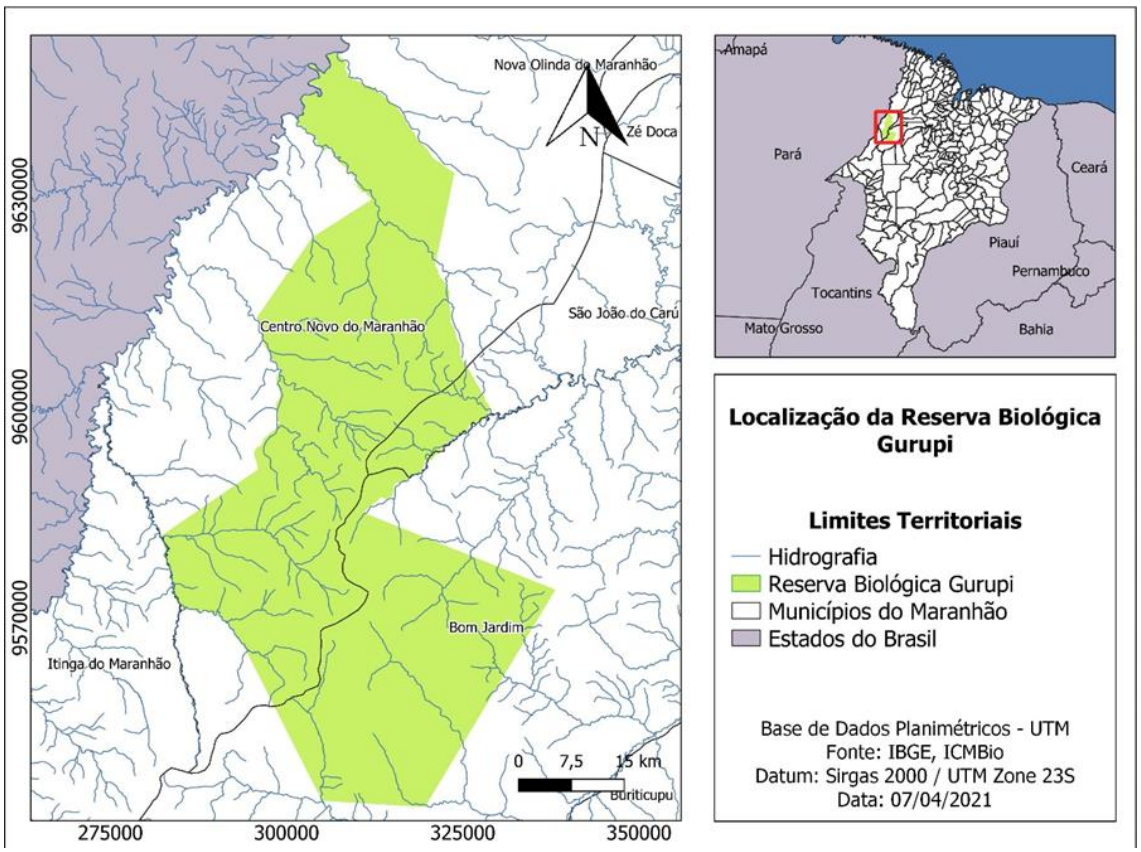


Figure 1. Location Map of the Gurupi Rebio.
Source: Author's own work.

The climate in the reserve is hot and humid tropical (As); according to the Koppen classification. The vegetation is transitional in character, with a predominance of dense submontane rainforest and soils characteristic of the Yellow Latosol (23.21%), Petric Plintosol (6.88%), and alluvial soils (GAMA et al., 2021).

One of the objectives of the Gurupi Biosphere Reserve is to preserve a representative sample of the region's tropical rainforests in the so-called "Maranhão Pre-Amazon," including its flora, fauna, geology, and associated biotic and abiotic aspects (BRASIL, 1988). The reserve contains both forest species important for maintaining biodiversity and high-value timber, making it attractive to the timber industry, even though it is classified as a UCPI (SILVA et al., 2020).

Research Characterization

This study is an investigative effort to illustrate the spatial and temporal dynamics of deforestation in the Gurupi Rebio, as well as changes in land use and land cover within this UCPI. To this end, the proposed methodology utilized data from the Brazilian Amazon Deforestation Monitoring Project (PRODES) to obtain deforestation polygons and utilized the 1:250,000-scale land-use mapping produced by the MapBiomas Project, which is currently in its fifth version (or Collection 5) following improvements and corrections to its maps, thereby increasing its reliability.

The analyses were divided into three stages: 1) obtaining spatial data on deforestation and land use and land cover; 2) processing and analyzing the spatial data; 3) creating maps of cumulative deforestation and multitemporal analysis of land use and land cover in the Gurupi Rebio. In addition to treating the Gurupi Biosphere Reserve as a whole, the analyses also considered changes by municipality to identify which areas were most affected by the dynamics addressed.

Acquisition of Spatial Data

The PRODES project conducts satellite monitoring of clear-cut deforestation in the Legal Amazon. It has, since 1988, produced annual deforestation rates for the region, which are used by the Brazilian government to establish public policies (INPE, 2021). The program uses LANDSAT imagery for its analyses, and its estimates are considered reliable by the national and international scientific community.

Established by Decree No. 6,666 of November 27, 2008, INDE is an integrated set of technologies designed to catalog, integrate, and harmonize geospatial data produced, maintained, and managed by Brazilian government institutions (INDE, 2021). Thus, it is possible to obtain deforestation data from PRODES via its website to load them into GIS software. PRODES deforestation shapes

the images used for the land use and land cover maps, which were obtained through the MapBiomas project, which is an initiative involving a collaborative network of experts in biomes, land use, remote sensing, GIS, and computer science for the annual mapping of land cover and land use in Brazil (MAPBIOMASa, 2021). The project uses Landsat images to produce annual land-use and land-cover classification maps at a scale of 1:250,000. The reference years selected were 2005, 2010, 2015, and 2019.

Processing and Analysis of Spatial Data

For standardization purposes, all data obtained for the spatial analyses were converted to the SRC SIRGAS 2000 / UTM Zone 23S coordinate system.

After loading the PRODES data, which covers the entire Legal Amazon, into QGIS version 3.16, an intersection of the polygons was performed for the area encompassing the interior of the Gurupi Rebio. Subsequently, the attribute table of each annual vector file was checked for duplicate deforestation polygons to ensure the correct calculation of each polygon's area, using Microsoft Excel 2013®. With this, using the software's calculator, the area of each polygon was calculated, followed by the sum of deforestation for each reference year and the cumulative total across them, also considering their distribution within the Rebio Gurupi areas spread across the municipalities of Bom Jardim, Centro Novo do Maranhão, and São João do Carú.

Regarding the MapBiomas images, an intersection was also performed for the Rebio Gurupi area, followed by the vectorization of the *raster* data for each reference year. In this way, it was possible to calculate the area of each land use and land cover class for subsequent analysis of their dynamics within the reserve.

Map Production

Following the previous steps, two maps were created to visually aid in understanding the dynamics of deforestation and changes in land use and land cover. The first map shows the locations of deforestation in the Gurupi Biological Reserve between 2005 and 2019, and the second shows the distribution of land-use and land-cover classes within the reserve according to MapBiomas.

Results and Discussion

PRODES identified that approximately 212,413 km² were deforested between 2005 and 2019. The municipality of Bom Jardim ranks second among municipalities with land within the Gurupi Biosphere Reserve, accounting for 35% of the reserve's total area, second only to Centro Novo do Maranhão, which holds 60% of the territory. However, the calculation of cumulative deforestation revealed that Bom Jardim had the highest cumulative deforestation in the reserve, totaling 111,987 km².

In terms of time, 2005 was the year with the highest deforestation among the study's reference years, with 58,893 km² of deforested area, notably in the municipality of Centro Novo do Maranhão, which accounted for 63% of this total. However, overall, deforestation has decreased over the years, with the municipality of São João Carú showing virtually no deforestation in more than half of the reference years. The data on deforested areas in the Gurupi Biosphere Reserve are shown in Table 1.

YEAR	BOM JARDIM	CENTRO NOVO DO MARANHÃO	SÃO JOÃO DO CARÚ	GURUPI BIORESERVE
2005	21,314	36,932	0.647	58,893
2006	5,667	14,091	0.104	19,862
2007	1,945	8,654	0	10,599
2008	25,276	10,844	0	36.12
2009	9,958	18,136	0	28,094
2010	8,674	3.03	0	11,704
2011	4,226	2.643	0.172	7,041
2012	6,229	2,255	0.097	8,581

2013	4,488	1,999	0.211	6,698
2014	0.371	0.127	0	0.498
2015	5.894	0.157	0	6.051
2016	4,495	0.106	0	4,601
2017	6,599	0.076	0	6,675
2018	3.688	0.073	0	3,761
2019	3,163	0.072	0	3,235
Cumulative	111,987	99,195	1,231	212,413

Table 1. Total deforested area per year by municipality in the Gurupi Biosphere Reserve, according to PRODES, in km^2. Source: Author's own work, using data obtained from INDE/FUNAI (2021).

The compilation of the cumulative deforestation map, illustrated in Figure 2, corroborates Table 1 by showing that the municipality of Bom Jardim has the highest deforestation concentration in the Gurupi Biosphere Reserve. It should be noted, however, that although the municipality of Centro Novo do Maranhão is not far behind Bom Jardim in terms of cumulative deforested area, spatially, deforestation is less concentrated in the former municipality compared to the latter.

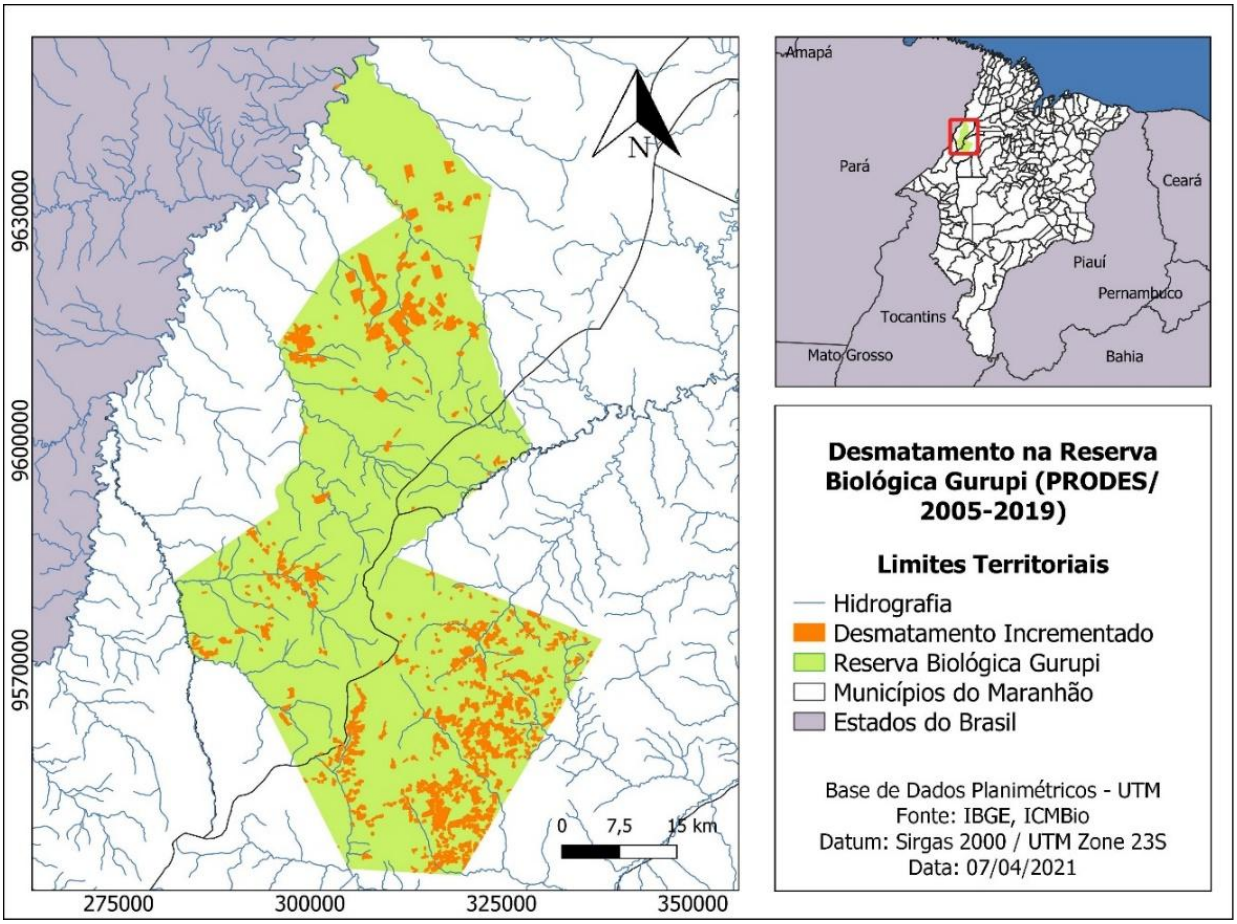


Figure 2. Map of cumulative deforestation in the Gurupi Biosphere Reserve between 2005 and 2019.

Source: Author's own work.

This may mean that, while deforestation in the municipality of Bom Jardim was concentrated in the same areas or occurred in a more localized manner, deforestation in the municipality of Centro Novo do Maranhão was more dispersed, with a significant portion of its area deforested during the 15-year study period.

In Centro Novo do Maranhão, deforestation was more concentrated in the northern portion of the Gurupi Rebio, though several significant polygons were also identified in its southern portion. In the municipality of São João do Carú, deforestation was concentrated along the border with Bom Jardim.

Illegal land occupation, cattle ranching, and criminal logging activities represent the main causes of deforestation in the Gurupi Biosphere Reserve. This has been occurring since the creation of the Gurupi Biosphere Reserve, carried out by groups of loggers and small farmers living within the reserve's boundaries (CARACCIOLO, 2013).

Complementing this statement, Martins and Oliveira (2011) describe, at least during the reserve's first decade of existence, the lack of stricter oversight of physical demarcation in the field and boundary marking. This, according to the authors,

allowed the continued issuance of property titles within the Rebio Gurupi, further complicating efforts to intervene in the forest and to address the biological devastation of the reserve.

According to Paiva et al. (2019), these activities place the reserve in a critical conservation situation, noting that ICMBio data indicate that approximately 70% to 80% of the territory has already been altered. Because of this, Celentano et al. (2018) consider the reserve's situation to be quite complex, as the UCPI has not yet been consolidated, which hinders its conservation objectives.

The introduction of the Action Plan for the Prevention and Control of Deforestation in the Legal Amazon (PPCDAm) in 2004 may have contributed to the reduction of deforestation in the Gurupi Biosphere Reserve, particularly during its second phase (2009–2011), which focused on monitoring and control (MMA, 2017).

Deforestation rates during this period fell due to the efficiency of the Real-Time Deforestation Detection (DETER) project, which, according to INPE (2021), is a rapid survey of alerts indicating changes in forest cover in the Amazon, conducted by the National Institute for Space Research (INPE), developed as an alert system to support the monitoring and control of deforestation and forest degradation carried out by the Brazilian Institute of the Environment and Renewable Natural Resources (IBAMA) and other agencies involved in this area.

DETER enables the swift implementation of integrated actions to monitor deforestation and combat organized crime, carried out by IBAMA, the Federal Police and Federal Highway Police, the National Public Security Force, and supported by the Brazilian Army (MMA, 2017). An example of this is described by ICMBio (2018), where satellite monitoring enabled the identification of areas where deforestation had occurred and allowed agents to inspect the sites, issue fines, seize assets, and place the affected areas under embargo.

Deforestation in the Gurupi Biosphere Reserve has altered land-use and land-cover dynamics. An analysis using MapBiomas maps identified eight land-use and land-cover types within the Gurupi Biosphere Reserve between 2005 and 2019. MapBiomas classes are defined by codes on its maps, corresponding to land use and land cover types, available in the legend of an official project document obtained at https://mapbiomas.org/codigos-de-legenda (INPE, 2021). Thus, the codes identified, along with their respective legends, were: 3 – Forest Formation; 4 – Savanna Formation; 9 – Planted Forest; 12 – Grassland Formation; 15 – Pasture; 33 – River, Lake, and Ocean; 39 – Soybean; and 41 – Other Temporary Crops.

Figure 3 illustrates the spatial distribution of each of the different land uses and land covers in the Gurupi Rebio for the reference years 2005, 2010, 2015, and 2019, while Table 2 illustrates the area corresponding to each of these classes.

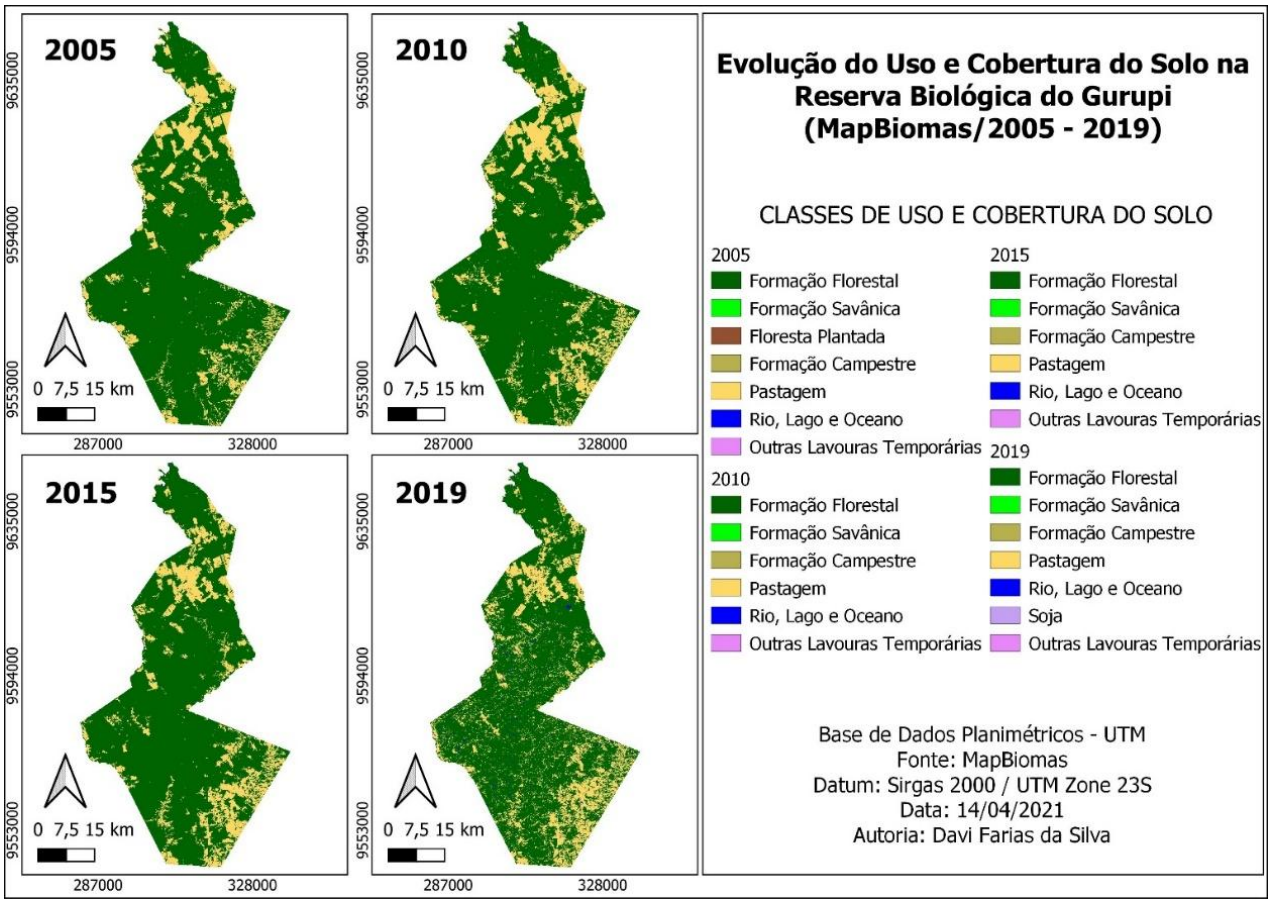


Figure 3. Multitemporal analysis of land use and land cover in the Gurupi Biosphere Reserve, according to MapBiomas, Class 5.
Source: Author's own work.

CLASS [CODE]	2005	2010	2015	2019
Forestry Education [3]	2,261.77	2,183.86	2,217.47	2098.98
Savanna Formation [4]	0.008	0.008	0.008	0.01
Planted Forest [9]	0.006	0	0	0
Open Land [12]	0.22	0.06	0.29	0.18
Pasture [15]	448.44	526.69	492.88	599.91
River, Lake, and Ocean [33]	1.67	1.89	1.80	12.00
Soybeans [39]	0	0	0	0.01
Other Temporary Crops [41]	0.45	0.07	0.13	1.48

Table 2. Area of land use and land cover classes in the Gurupi Biosphere Reserve, in km^2.
Source: Author's own work, based on data from MapBiomas.

Tables 3 through 5 below show the changes in the area of each class over the time intervals used in this study, where the columns—represented by the latest reference year—indicate the gains each class made from areas of other classes compared to the previous reference year, as shown in the rows.

Table 6, on the other hand, illustrates the distribution of forest formation classes across the Gurupi Biosphere Reserve relative to the municipalities in which it is located.

	Forest Class	Savanna Savanna	Formation Grassland	Pasture	River, Lake and Ocean	Other Crops Temporary	Area of Classes in 2005
Education Forestry	2,113.66	0	0	147.61	0.43	0.06	2,261.77
Education Savanna	0	0.008	0	0	0	0	0.008
Forest Planted	0.006	0	0	0	0	0	0.006
Education Rural	0.002	0	0.05	0.16	0.008	0	0.22
Pasture	69.81	0	0.005	378.57	0.03	0.009	448.44
River, Lake and Ocean	0.19	0	0.0008	0.06	1.41	0	1.67
Other Crops Temporary	0.18	0	0	0.27	0	0	0.45
Area of each class in 2010	2,183.86	0.008	0.06	526.69	1.89	0.07	2,712.59

Table 3. Transition matrix of land use and land cover classes in the Gurupi Biosphere Reserve between 2005 and 2010.
Source: Author's own work.

	Formation Forest	Formation Savanna	Formation Grassland	Pasture	River, Lake and Ocean	Other Crops Temporary	Area of Classes in 2010
Forestry Forestry	2,102.76	0	0	80.45	0.53	0.11	2,183.86
Education Savânica	0	0.008	0	0	0	0	0.008
Education Rural	0.001	0	0.011	0.04	0.003	0	0.06
Pasture	114.00	0	0.28	412.31	0.06	0.01	526.69
River, Lake and Ocean	0.66	0	0	0.03	1.19	0	1.89
Other Crops Temporary	0.03	0	0	0.03	0	0	0.07
Area of each class in 2015	2,217.47	0.008	0.29	492.88	1.80	0.13	2,712.59

Table 4. Transition matrix of land use and land cover classes in the Gurupi Biosphere Reserve between 2010 and 2015.
Source: Author's own work.

	Formation Forest	Formation Savanna	Formation Grassland	Pasture	River, Lake and Ocean	Soybeans	Other Crops Temporary	Area of Classes in 2015
Forestry Forestry	1983.10	0	0.007	223.22	10.00	0	1.12	2,217.47
Education Savanna	0	0.008	0	0	0	0	0	0.008
Education Rural	0.005	0	0.069	0.21	0	0	0	0.29
Pasture	115.17	0.005	0.09	376.35	0.87	0.01	0.36	492.88
River, Lake and Ocean	0.60	0	0.007	0.05	1.12	0	0	1.80
Other Crops Temporary	0.08	0	0	0.051	0	0	0	0.13
Area of each class in 2019	2,098.98	0.01	0.18	599.91	12.00	0.01	1.48	2,712.59

Table 5. Transition matrix of land use and land cover classes in the Gurupi Biosphere Reserve between 2015 and 2019. Source: Author's own work.

MUNICIPALITY	2005	2010	2015	2019
Bom Jardim	816,055	759,080	722,278	657,322
New Center of Maranhão	1,358,849	1,330,552	1,398,693	1,348,778
São João do Carú	86,472	93,667	96.35	93,609

Table 6. Extent of forest cover in the Gurupi Rebio in each municipality according to MAPBIOMAS data, in km^2. Source: Author's own work, based on MapBiomas data.

The tables show that forest cover in the Gurupi Rebio decreased by 162.79 km² between 2005 and 2019, while pasture area increased by 151.47 km², reflecting the main transition the original biome underwent due to deforestation. In this regard, the greatest reduction in forest area occurred in the Bom Jardim municipality, with deforestation of 158.73 km², or 98% of the total forest reduction in the Gurupi Biosphere Reserve, as shown in Table 6.

Table 4 shows that between 2010 and 2015, forest area increased and pasture area decreased. The first class recovered an area of 114 km² from the second class, which still managed to convert 80.45 km² of forest territory to itself. This situation may be linked to government plans to combat illegal logging in the Gurupi Biosphere Reserve. However, in the subsequent period, there was again a reduction in forest cover.

Although its area may be considered insignificant in relation to forest cover, MapBiomas Class 5 detected that savanna cover within the reserve nearly doubled. The presence of savanna cover in all years occurred only in the portion corresponding to the municipality of Centro Novo do Maranhão.

Deforested areas have higher surface albedo and lower moisture capacity, which affect the local energy budget by increasing sensible heat and decreasing latent heat. This can lead to the occurrence of hotspots, that is, a potential for fire or burning (ICMBIO, 2018).

Paiva et al. (2019) identified, for the years 1998, 2006, and 2016, that the regions with the highest occurrence of hotspots in the Gurupi Rebio are its northern, southern, and eastern portions—practically the same regions where the present study identified the greatest numbers of deforestation polygons and changes in forest cover to other land cover classes.

Forests are the most productive and biodiverse ecosystems on the planet, yet they are less resilient than ecosystems such as savannas or grasslands (MAPBIOMASb, 2021). Thus, critical changes resulting from deforestation that compromise local microclimate characteristics—such as reduced moisture retention—could lead to the consolidation of grassland ecosystems and the formation of savannas in the Gurupi Biosphere Reserve.

Hydrographic detection remained virtually unchanged between 2005 and 2015, with only minor increases. However, between 2015 and 2019, there was a sharp increase in the detection of this class, rising by approximately 5.85 times.

It is suggested that this may be due to the fact that deforestation in the Gurupi Biosphere Reserve during these years occurred near local rivers, particularly in areas corresponding to the municipality of Centro Novo do Maranhão.

In the municipality of Bom Jardim, in 2019, an area of 0.013 km² of soybean plantations was also detected, a monoculture that has been expanding in the state of Maranhão. Soybean cultivation is an enterprise that has been growing in Maranhão, particularly in the eastern part of the state, as evidenced by municipalities along the BR-222 highway, due to lower transportation and production costs (LLOPART et al., 2018). This suggests the possibility that farmers in the region are

attempting to introduce monoculture into the area, given that the Gurupi Biosphere Reserve is situated within a mosaic of the same name, which is bisected by the same highway.

Final Considerations

Data from the PRODES project revealed that between 2005 and 2019, Rebio Gurupi suffered cumulative deforestation of 212.413 km². The portion located within the municipality of Bom Jardim was the most affected, accounting for 111.987 km² of the total.

Among the reference years, 2005 had the largest deforested area (58,893 km²), while 2014 had the smallest (0.498 km²). However, overall deforestation in the Gurupi Biological Reserve has been declining.

The scientific literature indicates that the main causes of deforestation within the conservation unit are due to illegal occupation of the territory, cattle ranching, and criminal logging activities since its creation. The lack of stricter enforcement of physical demarcation in the field and boundary marking during its first decade of existence contributed to this situation, leading to changes in approximately 70% to 80% of the territory over the years.

The impact of deforestation on land use and land cover is evident in the decrease in forested areas on MapBiomas classification maps and the expansion of pasture in the region, with a higher concentration also in the portion of the Gurupi Biosphere Reserve located within the municipality of Bom Jardim. Between the first and last reference years of the analysis, approximately 162.31 km² of forest was lost, giving way to an increase of 161.67 km² of pasture, which may compromise the characteristics of the local microclimate, such as reduced moisture retention, which could lead to the consolidation of grassland ecosystems and the formation of savanna in the Rebio Gurupi.

Thus, it is concluded that the methodology presented proved effective for understanding the territorial dynamics of deforestation in the Gurupi Biological Reserve and the resulting changes in land use and land cover within the reserve. It can be applied to other conservation areas and assist regulatory agencies with the corresponding legal authority in decision-making.

References

ALMEIDA, A. S.; VIEIRA, I. C. G. Belém Endemism Center: status of remaining vegetation and challenges for biodiversity conservation and ecological restoration. Revista de Estudos Universitários, vol. 36, no. 3, pp. 95–111, 2010.

BARROS, R. A.; BARBOSA, R. S. Conservation units: a study on the environmental impacts resulting from timber extraction in the Gurupi Biological Reserve, MA. InterEspaço: Journal of Geography and Interdisciplinarity, vol. 1, no. 2, pp. 270–292, 2015.

BRAZIL. Decree No. 95,614, of January 11, 1988. Creates the Gurupi Biological Reserve and provides other measures. Brasília, 1988. Available at: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D95614.htm#:~:text=DECRETO%20No%2095.614%2C%20DE,Gurupi%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAncias.>. Accessed on: 04/13/2021.

CAPANEMA, V. P.; PINHEIRO, T. F.; ESCADA, M. I. S.; SANT'ANNA, S. J. Mapping patterns of forest degradation intensity: a case study in the Sinop region, Mato Grosso. Brazilian Journal of Cartography, vol. 70, no. 1, pp. 199–225, 2018.

CARACCIOLO, P. **Threats to the Gurupi Biological Reserve**. Emílio Goeldi Museum of Pará, 2013. Available at: <https://www.museu-goeldi.br/noticias/as-ameacas-a-reserva-biologica-do-gurupi>. Accessed on: 04/14/2021.

CELENTANO, D.; MIRANDA, M. V. C.; MENDONÇA, E. N.; ROUSSEAU, G. X.; MUNIZ, F. H.; LOCH, V. C.; VARGA, I. D.; FREITAS, L.; ARAÚJO, P.; NARVAES, I. S.; ADAMI, M.; GOMES, A. R.; RODRIGUES, J. C.; KAHWAGE, C.; PINHEIRO, M.; MARTINS, M. B. Deforestation, degradation, and violence in the "Gurupi Mosaic" – The most threatened region of the Amazon. Estudos Avançados, vol. 32, no. 92, pp. 315–339, 2018.

C.I. – INTERNATIONAL CONSERVATION. Belém Endemism Center. 2021. Available at: <https://www.conservation.org/brasil/onde-trabalhamos/centro-de-endemismo-belem>. Accessed on: March 23, 2021.

COPERTINO, M.; PIEDADE, M. T. F.; VIEIRA, I. C. G.; BUSTAMANTE, M. Deforestation, fire, and climate are closely connected in the Amazon. Science and Culture, vol. 71, no. 4, pp. 04–05, 2019.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The State of the World's Forests 2022: forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient, and sustainable economies**. Rome: FAO, 2022.

GAMA, L. H. O. M.; PAIVA, P. F. P. R.; SILVA JÚNIOR, O. M.; RUIVO, M. L. P. Environmental modeling and the use of artificial intelligence for deforestation forecasting: the case of the Gurupi-MA Rebio. **Research, Society and Development**, vol. 10, no. 2, 2021.

GUAYASAMIN, J. M.; RIBAS, C. C.; CARNAVAL, A. C.; CARRILLO, J. D.; HOORN, C.; LOHMANN, L. G.; RIFF, D.; ULLOA, C. U.; ALBERT, J. S. Evolution of Amazonian biodiversity: A review. **Acta Amazonica**, vol. 54, pp. 1–34, 2024.

HENTZ, Â. M.; CORTE, A. P.; DOUBRAWA, B.; SANQUETTA, C. R. Assessment of the fragmentation of forest remnants in the Iguaçu River Basin–PR, Brazil. **Biosfera Encyclopedia**, vol. 11, no. 21, pp. 2842–2858, 2015.

ICMBIO – Chico Mendes Institute for Biodiversity Conservation. **Gurupi conducts operation to combat deforestation**. Brasília, DF: 2018. Available at: < https://www.icmbio.gov.br/portal/ultimas-noticias/20-geral/9903-gurupi-realiza-operacao-para-combater-o-desmatamento>. Accessed on: 10/28/2021.

INDE – National Spatial Data Infrastructure. **Presentation**. 2021. Available at: <https://www.inde.gov.br/Inde/Apresentacao>. Accessed on: 04/12/2021.

INPEa – National Institute for Space Research. **Prodes – Amazon. 2021**. Available at: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Accessed on: 04/12/2021.

INPEb – National Institute for Space Research. **DETER**. São José dos Campos, SP: 2021. Available at: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/deter/deter>. Accessed on: 10/28/2021.

LAPOLA, D. M.; et al. The drivers and impacts of Amazon forest degradation. **Science**, vol. 379, no. 6630, 2023.

LLOPART, M.; REBOITA, M.S.; COPPOLA, E.; GIORGI, F.; DA ROCHA, R.P.; DE SOUZA, D.O. Land use change over the Amazon forest and its impact on the local climate. **Water**, vol. 10, no. 149, 2018.

MAPBIOMASa. **MAPBIOMAS Collections**. 2021. Available at: <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR>. Accessed on: 04/14/2021.

MAPBIOMASb. **Legend Codes – Collection 5**. 2021. Available at: <https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/downloads/C%C3%B3digos_das_classes_da_legenda_e_paleta_de_cores.pdf>. Accessed on: 04/14/2021.

MMA – Ministry of the Environment. **REDD+ Brazil: PPCDAm**. Brasília, DF: 2017. Available at: <http://redd.mma.gov.br/pt/acompanhamento-e-a-analise-de-impacto-das-politicas-publicas/ppcdam>. Accessed on: 10/28/2021.

MARTINS, M. B.; OLIVEIRA, T. G. **The Maranhão Amazon: Diversity and Conservation**. Belém: Emílio Goeldi Museum of Pará, 2011. Available at: <http://ppbio.museu-goeldi.br/sites/default/files/Meu_livro.pdf>. Accessed on: 04/16/2021.

NEVES; A. K.; KÖRTING, T. S.; FONSECA, L. M. G.; ESCADA, M. I. S. Assessment of TerraClass and MapBiomas data on legend and map agreement for the Brazilian Amazon biome. **Acta Amazonica**, vol. 50, no. 2, pp. 170–182, 2020.

PAIVA, P. F. P. R.; SILVA JÚNIOR, O. M. S.; MACIEL, M. N. M.; BRAGA, T. G. M.; ROCHA, E. S.; GAMA, L. H. O. M. Multitemporal analysis of heat spots in the Gurupi Biological Reserve, Maranhão. **Scientific Agriculture in the Semi-Arid Region**, vol. 15, no. 4, pp. 307–314, 2019.

PAVÃO, V. M.; NASSARDEN, D. C. S.; PAVÃO, L. L.; MACHADO, N. G.; BIURDES, M. S. Impact of the conversion of natural vegetation to pasture and urban areas on biophysical variables in southern Amazonas. **Brazilian Journal of Meteorology**, vol. 32, no. 3, pp. 343–351, 2017.

PLETSCH, M. A. J. S.; PENHA, T. V.; JUNIOR, C. H. L. S.; KÖRTING, T. S.; OLIVEIRA, L. E.; ARAGÃO, C.; ANDERSON, L. O. Integration of the FMASK algorithm into the linear spectral mixing model to aid in the detection of burned areas in the Brazilian Amazon. **Brazilian Journal of Cartography**, vol. 70, no. 2, pp. 696–724, 2018.

ROSA, M. R. Comparison and analysis of different methodologies for mapping and assessing forest cover in the Atlantic Forest. **Boletim Paulista de Geografia**, vol. 95, pp. 25–34, 2016.

SILVA, M. G.; FARO, B. L. S. O.; ALMEIDA, H. P.; MORALES, G. P.; MARTINS, A. C. C. T.; PONTES, A. N. Application of NDVI for spatiotemporal analysis of vegetation cover in the Gurupi Biological Reserve, Maranhão. Environmental Education in Action, vol. XIX, no. 74, 2021.

HYDROLOGICAL RISK SIMULATION DATA SUPPORT AND ANALYSIS SYSTEM

1 Julio Cesar da Silva Rodrigues, 2 Marconi de Arruda Pereira, 3Andrés Velastegui-Montoya
1 Federal University of São João del-Rei, e-mail: julio.csr.271@aluno.ufsj.edu.br; 2 Federal University of São João del-Rei, e-mail: marconi@ufsj.edu.br; 3 ESPOL Polytechnic University, email: dvelaste@espol.edu.ec

Keywords: hydrological hazard; hydrological simulation; geographic databases.

Abstract

Hydrological disasters represent one of the main threats to urban areas, aggravated by factors such as climate change, unplanned urbanization, and inadequate drainage infrastructure. The analysis and automated mitigation of these events depend heavily on the integration of geographic data, hydrological information, and the results of computational simulations. In this context, this work presents a data support and analysis system focused on hydrological risk simulation in urban environments. This paper is based on the modeling and implementation of a geographic database using the OMT-G standard and the PostGIS geographic database management system (GDBMS), integrating spatial data, precipitation time series, and simulation results generated with the Storm Water Management Model (SWMM). The system centralizes the storage, management, and querying of these data, enabling advanced spatial analyses aimed at urban planning, risk management, and social impact assessment. In addition, a prototype of an interactive graphical user interface is presented, allowing real-time visualization of simulation data. The results demonstrate that the proposed approach contributes to improved management and reuse of hydrological and geographic data, offering relevant resources for decision-making in urban hydrological hazard scenarios.

Introduction

Hydrological disasters are events whose occurrences date back to the time humans began inhabiting planet Earth. In this context, such disasters include (but are not limited to) waterlogging and flooding. Floods are defined as the overflow of water from the normal levels of rivers and lakes into surrounding areas, while waterlogging is associated with water accumulation caused by failures or insufficient urban drainage systems.

There are numerous causes for this type of disaster, ranging from simple excessive precipitation to more complex factors such as climate change (e.g., global warming), unplanned urbanization (i.e., soil impermeabilization and occupation of risk-prone areas), deforestation and environmental degradation (i.e., water runoff occurs faster and in greater volume as vegetation decreases), and inadequate infrastructure (i.e., outdated, insufficient, or poorly maintained drainage systems).

Motivation

At national level, the most notable and recent example of a hydrological disaster is the flooding that occurred in Rio Grande do Sul in 2024. According to a study conducted by the National Water and Sanitation Agency (ANA) [ANA, 2025], the event represents the largest natural disaster in the state's history to date, causing hundreds of deaths and displacing thousands of citizens. However, the impacts of disasters of this type go beyond the loss of lives.

At international level, we can look at the floods in Pakistan in recent months, whose impact has been even greater in magnitude compared to the events in Rio Grande do Sul, leaving millions of people displaced [ANGELO, 2025]. Moreover, as it is a country with a low Human Development Index (HDI), there are also biological risks in some regions, including water contamination and the increased spread of diseases such as cholera and hepatitis A. In 2022, these events were even more severe, leaving approximately one-third of the country underwater.

Unlike a biological disaster (e.g., the COVID-19 pandemic), a hydrological disaster has the potential not only to cause deaths but also to generate significant financial losses in the housing sector, negative impacts on education and healthcare (i.e., destruction of school and hospital infrastructure due to accumulated water), damage to agriculture and livestock, and environmental degradation (i.e., fauna and flora), amongst other short and long-term effects.

Finally, in addition to the numerous factors that may cause or contribute to a given region experiencing hydrological disasters, there is an inherent problem in physics whose solution remains unknown, and it is not even certain whether it can be found: the existence and smoothness of the Navier–Stokes equations [FEFFERMAN, 2006]. This is one of the seven Millennium Prize Problems [CARLSON et al., 2023], alongside P vs. NP.

Informally, the Navier–Stokes equations are a set of differential equations that describe fluid mechanics. In other words, these equations can determine water behavior at any given time. However, an analytical solution to that problem is still unknown; therefore, numerical methods are used to approximate it. Should such a solution be found, a considerable part of hydrological risk analysis would be simplified, enabling precise water flow prediction in regions at any point in time.

Proposal

Given the context and motivation presented, it is reasonable to conclude that accurately determining the degree of hydrological risk for any given region is currently a hard problem. However, several heuristic-based solution approaches exist in the context of hydrological risk prediction [GUIMARÃES et al., 2021; DE PAULA et al., 2023]. One such approach involves modeling rainfall runoff through the application of ordinary differential equations.

Given a layered data structure in the Quantum Geographic Information System (QGIS), information such as altimetry and topological street data is extracted, considering the study area within the georeferenced satellite image. Subsequently, each of these components is tabulated into a file (i.e., latitude and longitude of each point), which is used as input for the Storm Water Management Model (SWMM) [ROSSMAN et al., 2010], a software tool for modeling rainwater runoff.

To simulate rainfall time series, SWMM approximately solves the Saint-Venant equations [DE SAINT-VENANT et al., 1871], a set of partial differential equations derived from the Navier–Stokes set. As simulation results, a heat map of the studied region is generated, where warm colors indicate streets in which water accumulation exceeded safe levels, along with some statistics (e.g., time of highest criticality and flow peak).

However, managing the steps required to build a rainwater runoff simulation study for any area of interest was still quite limited. Projects were organized within file systems, that is, directories containing data layers (e.g., shapefiles and rasters), making it necessary to manually specify the correct paths for saving and handling data in each study case. In addition, the output paths in the script always had to be updated accordingly to the structure of the QGIS project currently in use. The inclusion of new input layers in the script was also problematic, since in such cases it was necessary to maintain an adapted copy of the same script for each project, depending on the operational layers.

Once the file used to feed SWMM was generated, the simulation was typically executed in a separate Jupyter notebook using the PySWMM wrapper [MCDONNEL et al., 2020] or via the software's graphical interface, producing output files in an unstructured manner containing simulation data. It was also always necessary to manually define simulation settings in advance whenever switching between projects. In general, all file export or generation processes were prone to issues, ranging from project management to accidental overwriting of important simulations.

At this point, the proposal is to develop a system that centralizes and integrates sets of geographic and non-geographic data in an organized manner using a geographic database management system. As preliminary features, it should support basic create and edit operations for each entity (with flexibility to include new ones), store simulation configurations and results, and allow for their visualization. In other words, given the layered data structure in QGIS, the goal is to build a system that supports a centralized and integrated data processing pipeline, as well as the execution of simulations and visualization of their results.

Methodology

Database Modeling

The geographic database modeling was carried out using the OMT-G standard [BORGES et al., 2001] with the OMT-G Designer tool, enabling representation of georeferenced classes and spatial relationships. There are four essential geographic entities whose data feed the rainwater runoff simulations.

Districts are one of the central elements of the study and are characterized as geo-objects that must be contained within two geo-fields: the raster satellite image of the study area and the digital elevation model (DEM, i.e., altimetry), also represented as a raster image. In other words, districts are represented as polygons (subregions of a municipality) that must be covered by two tessellation geo-fields (i.e., satellite imagery and DEM). Another essential geo-object for the simulations is the streets, which must intersect the districts. In this case, these streets are represented as unidirectional lines that have an intersection relationship with the districts (i.e., streets that touch the border/edge of the satellite image are also included). These streets form an arc-node network, where direction is defined by the lowest altitude between each pair of nodes, simulating the direction of water flow and enabling the application of graph algorithms with the support of the pgRouting tool.

There are also geo-objects that may be studied in the context of more complex simulations, whose support within the database may be useful. For this reason, classes for river basins, demographic densities, and risk areas were included, all represented as polygons intersecting districts. A river basin is a territory where rainwater converges to a single main river or outlet, making it highly relevant in the context of runoff simulation. Demographic densities can be used in result analysis, evaluating population concentration on streets exposed to critical hydrological hazards. Finally, risk areas can be instantiated to validate simulation results, highlighting most affected locations.

Additionally, just as demographic densities can enrich the analysis of risk areas, classes corresponding to hospitals, educational institutions, subway stations, and hydrological disasters themselves were also included. All of these are represented as points covered by districts, enabling potential impact analyses on education, healthcare, and transportation in the event of hydrological disasters. Subway lines were also added as a class and represented as lines, since many operate in underground environments and are subject to hydrological hazard conditions. In the context of flooding, analyzing water masses (e.g., rivers and lakes) and drainage systems in the studied region can be extremely important. Therefore, these entities were also included as geo-objects that may intersect with districts.

Finally, there is a class for rain gauges, represented as points that may be covered by districts. From these rain gauges, precipitation data are extracted for use by non-geographic classes. One such class is the rainfall event (i.e., precipitation), which may contain precipitation data from each rain gauge. These events form time series that, together with geographic data, can feed rainwater runoff simulations with predefined hyperparameters, producing results that persist in the database. The **result** class stores the streets and their corresponding hydrological stress levels for which simulations have been executed.

In total, the model contains 20 classes, of which only 2 represent non-geographic entities, and 4 are derived from specialization. A summary of the geographic entities and their forms of representation is presented in Table 01. The OMT-G diagram is shown in greater detail in Figure 01, presenting the database modeling in a graphical form.

Table 01: Geographic classes and their representations in database modeling.

Class	Representation	Type
Satellite Image (Specialization of Raster Image) Digital Elevation Model (Specialization of Raster Image)	Tessellation	Geo-field
District River Basin Permeability Rate Risk Area Demographic Density Water Mass	Polygon	Geo-object
Street (unidirectional: arc-node network) Drainage System Subway Line Result (unidirectional: arc-node network)	Line	
Rain Gauge Hydrological Disaster Hospital Subway Station Private Institution (Specialization of Educational Institution) Public Institution (Specialization of Educational Institution)	Point	

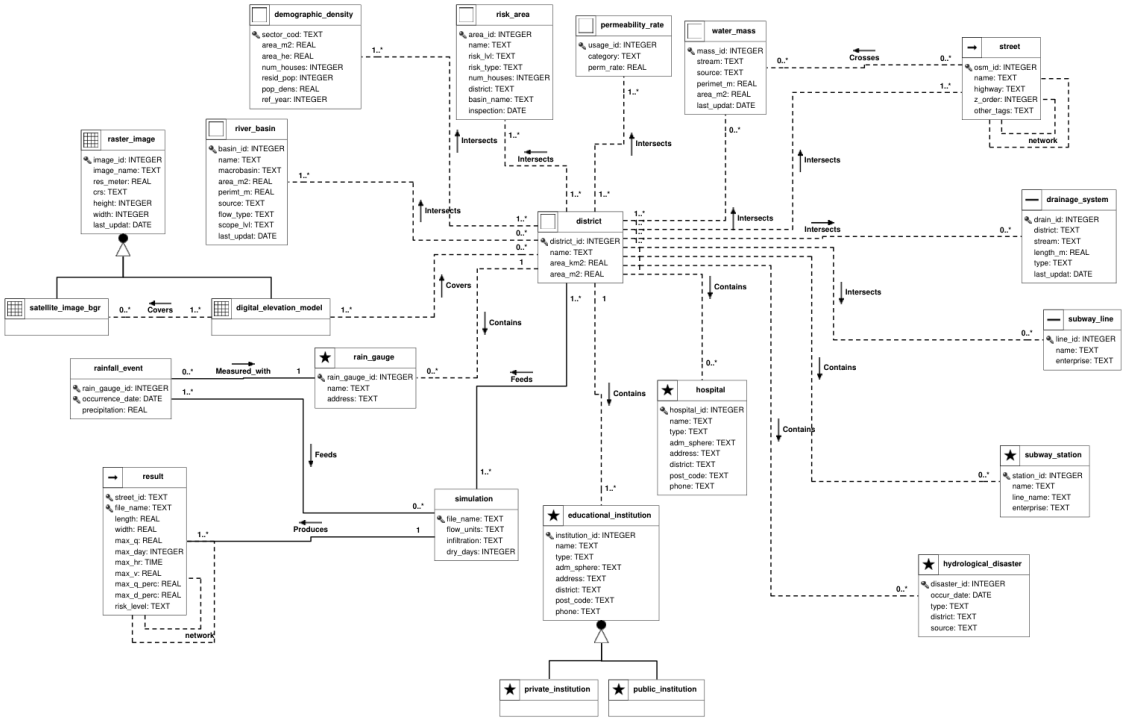


Figure 01: OMT-G diagram representing database modeling.

Implementation

After completing the conceptual modeling, the physical implementation of the database was carried out using PostGIS, an open-source extension for the relational DBMS PostgreSQL, which adds support for Geographic Information System (GIS) objects and functions. The Structured Query Language (*SQL)* extension scripts responsible for database creation (i.e., tables and indexes) and spatial integrity constraints were generated automatically using the OMT-G Designer CASE tool.

In addition to PostGIS, the following extensions were also incorporated: *postgis_raster*, to enable the manipulation of satellite images and DEMs, and AST-PostGIS [LIZARDO; DAVIS JR, 2017], an extension that introduces advanced spatial data types and implements spatial integrity constraints, increasing the level of abstraction and facilitating geographic data management. Finally, the database is built as a Docker container and orchestrated with Docker Compose. The source code and instructions for building the application as a whole are publicly available at https://github.com/juliorodrigues07/hydro-hazard.

Populating the Database

To extract satellite imagery, Google Earth was used with maximum available resolution (i.e., 8192×4468). A single image covering portion of the eastern zone of the municipality of São Paulo was obtained and georeferenced in QGIS. Within the same environment, streets data contained in the districts were extracted via plugin using OpenStreetMap. The DEM (also a single raster) was obtained from the Alaska Satellite Facility website, with a resolution of 12.5 meters.

Rainfall event data were collected as daily precipitation time series per rain gauge located in the municipality, through the SIBH platform, which provides rainfall data covering the entire state of São Paulo. The permeability rate was obtained from the MapBiomas platform, using a raster image of land usage categories for the state of São Paulo in 2023, with a resolution of 10 meters.

The land usage corresponding only to the municipality of São Paulo was extracted based on the municipal boundary (obtained from the IBGE website) using the GDAL tool. The resulting raster image was vectorized in QGIS using the GRASS plugin, applying edge smoothing. Finally, a permeability rate (in percentage) was assigned to each land usage category and its respective areas (i.e., polygons), using the rates and categories from the permeability map of the municipality of Belo Horizonte as a reference for calibration (available at BH Map website, officially maintained by the city hall).

To extract the remaining data, the main source used was GeoSampa, a platform maintained by the São Paulo city government that provides data across multiple domains. All geo-object data were extracted in shapefile format and preprocessed using Python scripts with the pandas, GeoPandas, and Shapely libraries, in the EPSG:31983 coordinates reference system. Simulation input data and results are handled internally within the application, based on data from streets, districts, permeability rates, and the DEM. Simulation and result exports are performed using the PySWMM and swmmio libraries, respectively. A summary of the tables implemented in the database and their respective data sources is presented in Table 02.

Table 02: Database tables and their respective data sources.

Table	Source
Satellite Image	Google Earth
Digital Elevation Model	Alaska Satellite Facility
Permeability Rate	MapBiomas
Street	OpenStreetMap
Rainfall Event	Sistema Integrado de Bacias Hidrográficas
Result Simulation	Locally Generated
District River Basin Risk Area Demographic Density Water Mass Drainage System Subway Line Rain Gauge Hydrological Disaster Hospital Subway Station Private Institution Public Institution	GeoSampa

The database is populated using a second Docker container, which is executed only after the full initialization of the container responsible for the GDBMS. This population container runs a series of commands defined in a shell script, along with preprocessing operations on the raw data files. Satellite images and DEMs are inserted using the command-line tool provided with the PostGIS extension: raster2pgsql. Geo-objects data are inserted using the shp2pgsql command-line tool. At this stage, street data were the only ones presenting invalid geometries with self-tangency or self-intersection (128 out of 199,559 extracted). Since this represents a negligible fraction of the total (approximately 0.06%), these entries were discarded during database insertion.

Finally, metadata from the satellite image and DEM (e.g., acquisition date, resolution) are extracted using the Rasterio library and inserted through the previously mentioned Python scripts. Precipitation, simulation, and result data are also preprocessed and inserted using these scripts. The connection to the database is established using the Psycopg library.

Results and Discussions

To provide access to queries in the database and display their respective results, a graphical user interface prototype was developed. The interface was built using Streamlit, while database queries are performed using the SQLAlchemy library, as the management of returned data is carried out with pandas, GeoPandas, and Shapely libraries.

The prototype supports real-time execution and visualization of these queries, with simple and intuitive interface elements. Once simulation results are selected, it is possible to filter districts, hydrological hazard levels, and distance using selection boxes and sliders, respectively. Therefore, for each simulation result, it is possible to analyze schools, metro stations, and hospitals within specific district(s) that are located within a given distance from streets with certain hydrological risk levels included in that simulation. A real-time graphical display of the results was implemented using the Folium library, enabling stylized and interactive visualization of geographic data. The interface screen responsible for providing these features is shown in Figure 02.

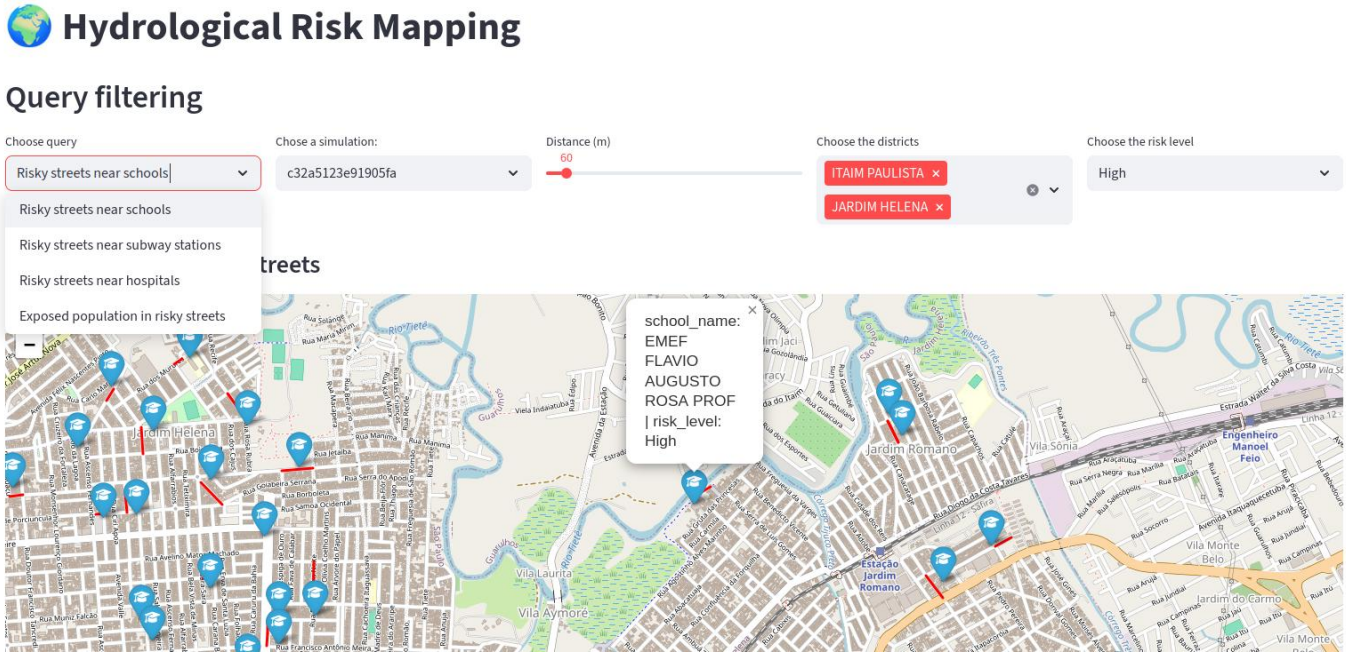


Figure 02: Tab I - Prototype of parameterized queries for hydrological impact analysis.

A second screen was also implemented as a prototype for simulation accuracy analysis. In Figure 03, it is again possible to select a simulation and filter the involved districts and types of associated hydrological disaster occurrences. This screen presents a dashboard outline, displaying a boxplot chart that relates the distance of each real-world occurrence to the nearest street in which simulation has reported any hazard level. Alongside it, a bar chart shows the number of occurrences by type included in the analysis. These charts are also interactive and generated in real time using the Plotly Express library, as filters are adjusted.

Finally, there is a third tab in the application dedicated to generating '.inp' extension files and executing simulations. It is possible to modify simple parameters ranging from file name and measurement units to infiltration methods and rainfall time series for the simulation. Once executed through the interface, the results are automatically stored in the database, making them available for selection in the previous tabs to perform queries and analyses.

In summary, there are three Docker containers orchestrated with Docker Compose. Each of these containers corresponds to a part of the application: the graphical interface continuously interacts with the database, while the data population component interacts with it only during the application's building phase. The overall architecture of the system is illustrated in Figure 04.

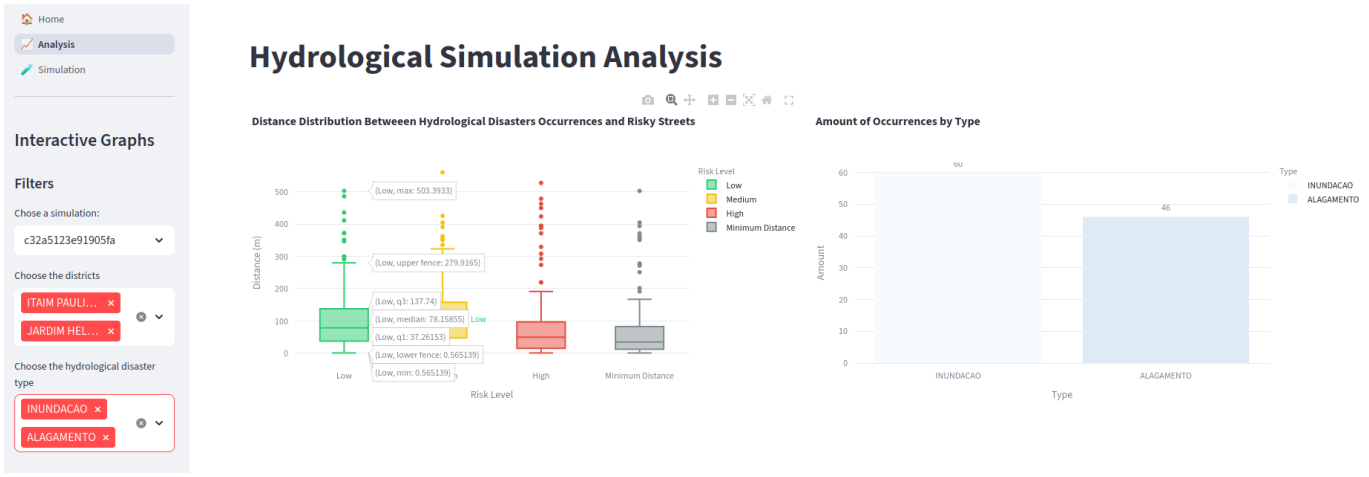


Figure 03: Tab II – Dashboard prototype for simulation accuracy analysis.

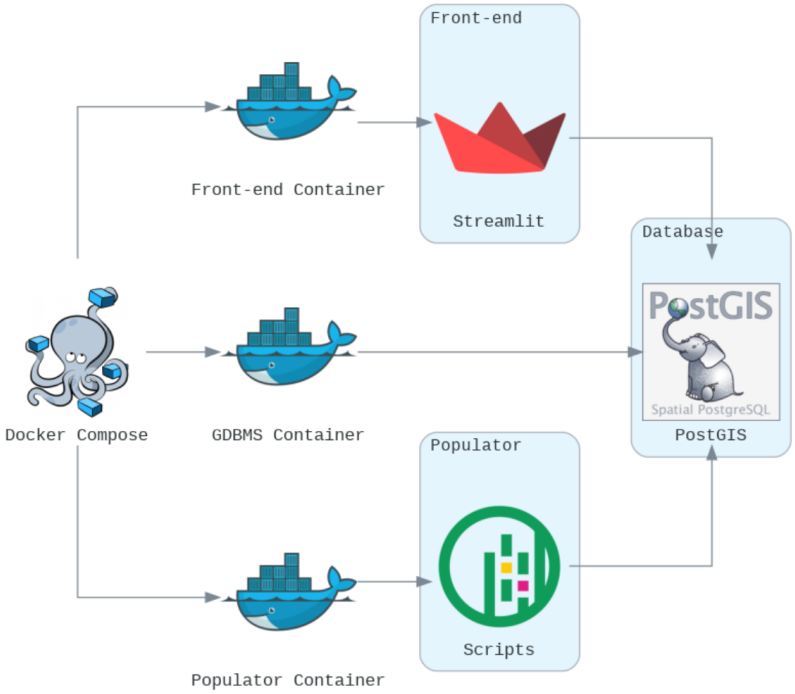


Figure 04: Representative diagram of the application architecture.

Limitations

Regarding data insertion, the database currently allows only one raster image per tessellation table. When attempting to insert additional DEMs, for example, violations of raster integrity constraints are triggered, such as differences in resolution and image dimensions. In other words, DEMs or satellite images with distinct metadata (i.e., resolution, width, height, etc.) cannot be stored within the same table. This significantly limits the expansion of the application to support visualization, analysis, and simulation for multiple regions, since DEMs are essential for hydrological simulations, and it is not possible to store those from different municipalities within a single table. As a result, support for data from other territories and their corresponding simulations is compromised.

Regarding precipitation data, although such is available and has been populated, the corresponding table currently has no practical use. The purpose of including this type of data is to enable flexibility when generating '.inp' extension files with different time series for hydrological simulations. For example, real precipitation time series from other districts could be used to simulate potential hydrological vulnerabilities in any given district, considering distinct and realistic climate scenarios observed in other studied regions.

Finally, another point of concern is that, since shapefiles have a significant limitation regarding attribute name length (i.e., 10 characters), the attribute names currently present in the database have low semantic value, which reduces its maintainability. In addition, the absence of auxiliary attribute dictionary files for many of the collected datasets makes database construction and attribute interpretation more error-prone and less reliable.

Conclusions

This work presented the development of a hydrological risk simulation data support and analysis system, focusing on the integration, management, and exploration of geographic and non-geographic data for urban environments. The proposal addressed a recurring limitation in hydrological simulation studies, related to data fragmentation, excessive reliance on file-based structures, and the difficulty of reusing and comparing results across different projects and scenarios.

The use of the OMT-G standard for conceptual modeling, combined with physical implementation in a GDBMS based on PostgreSQL, proved to be suitable for representing the complexity of the involved entities and their spatial relationships. The centralization of input data, simulation configurations, and results enabled modeling of expressive spatial queries, allowing hydrological impact analyses involving urban infrastructure, public facilities, and populations exposed to risk. The graphical user interface prototype reinforced the system's practical applicability, highlighting its potential as a tool to support urban planning and risk management.

Although the system still presents structural and functional limitations, especially regarding flexibility in supporting multiple territories, the obtained results indicate that the proposed approach is both viable and promising. This work established a solid foundation for future developments, both in improving the data model and expanding the analytical and operational capabilities of the application.

Bibliographic References

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Estudo aponta que enchentes de 2024 foram maior desastre natural da história do RS e sugere caminhos para futuro com eventos extremos mais frequentes. Brasília, DF, 30 abr. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/estudo-aponta-que-enchentes-de-2024-foram-maior-desastre-natural-da-historia-do-rs-e-sugere-caminhos-para-futuro-com-eventos-extremos-mais-frequentes>. Acesso em: 8 abr. 2026.

ANGELO, Claudio. Enchentes no Paquistão já desalojam 2 milhões. Observatório do Clima, 5 set. 2025. Disponível em: <https://www.ihu.unisinos.br/656921-enchentes-no-paquistao-ja-desalojam-2-milhoes>. Acesso em: 8 abr. 2026.

BORGES, Karla A. V.; DAVIS, Clodoveu A.; LAENDER, Alberto H. F. OMT-G: an object-oriented data model for geographic applications. GeoInformatica, v. 5, n. 3, p. 221-260, 2001.

CARLSON, James; JAFFE, Arthur; WILES, Andrew (Ed.). The millennium prize problems. American Mathematical Society, Clay Mathematics Institute, 2023.

DE PAULA, Leonardo H. D.; PEREIRA, Marconi A.; TEIXEIRA, Emanuel K. C.; MONTOYA, Andrés V. Um Método para Simulação do Escoamento de Águas Pluviais em Logradouros Usando Ondas Dinâmicas. XXIV Brazilian Symposium on Geoinformatics, p. 477-482, 2023.

DE SAINT-VENANT, Adhémar J.-C. et al. Théorie du mouvement non-permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit. CR Acad. Sci. Paris, v. 73, n. 147-154, p. 237-240, 1871.

FEFFERMAN, Charles L. Existence and smoothness of the Navier-Stokes equation. The millennium prize problems, v. 57, n. 67, p. 22, 2006.

GUIMARÃES, Pedro V. D.; PEREIRA, Marconi A.; TEIXEIRA, Emanuel K. C.; DAVIS, Clodoveu A.; PUJATTI, Mario A. S. A framework for the generation of the rainwater flow model in streets. XXII Brazilian Symposium on Geoinformatics, p. 1-12, 2021.

LIZARDO, Luís E. O.; DAVIS JR, Clodoveu A. A PostGIS extension to support advanced spatial data types and integrity constraints. In: Proceedings of the 25th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. 2017. p. 1-10.

MCDONNELL, Bryant E.; RATLIFF, Katherine.; TRYBY, Michael E.; WU, Jennifer J. X.; MULLAPUDI, Abhiram. PySWMM: the python interface to stormwater management model (SWMM). Journal of open source software, v. 5, n. 52, p. 1, 2020.

ROSSMAN, Lewis A. et al. Storm water management model user's manual, version 5.0. Cincinnati, OH, USA: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2010.

ANÁLISE MULTITEMPORAL DA COBERTURA VEGETAL NA REGIÃO DA CHAPADA DOS GUIMARÃES UTILIZANDO DADOS DO MAPBIOMAS (1985–2024)

1Amanda Evellyn de Oliveira Pacheco, 2Carlos André Bassi Zacarkim, 3Emelly Telles Felix da Silva, 4Gabriel Henrique de Albuquerque Leite, 5Julia Costadelle Patrício, 6Milena Falchetti Santos

1 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: amandapchco@gmail.com; 2 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: czacarkim7@gmail.com; 3 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: emellytelesfelix@gmail.com; 4 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: gabriel.albuquerque.leite@gmail.com; 5 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: costadelle.j@gmail.com; 6 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: milena.sanchetti@gmail.com

Palavras-chave: MapBiomas; cobertura vegetal; análise multitemporal.

Resumo

A presente pesquisa analisou a dinâmica da cobertura e uso do solo na região da Chapada dos Guimarães, Mato Grosso, Brasil, a partir de dados do MapBiomas, referentes ao período de 1985 e 2024. A plataforma disponibiliza séries anuais de cobertura e uso da terra no Brasil, com resolução espacial de 30 metros. A área de estudo foi delimitada com base no polígono do município/Área de Proteção Ambiental (APA) de Chapada dos Guimarães, permitindo a extração de mapas e estatísticas temporais.

Os resultados indicaram alteração na distribuição das classes de vegetação nativa e expansão de usos antrópicos, especialmente pastagem e agricultura, ao longo do período analisado. A utilização de geotecnologias e dados secundários processados mostrou-se adequada para compreender a dinâmica espacial da paisagem e subsidiar ações de monitoramento ambiental.

Além disso, a análise multitemporal possibilitou identificar padrões espaciais de mudança na paisagem, evidenciando a fragmentação de áreas de vegetação nativa e a expansão de usos antrópicos de forma heterogênea no território. Essas alterações indicam não apenas a redução quantitativa da cobertura natural, mas também mudanças na sua configuração espacial, o que pode comprometer a conectividade ecológica e intensificar processos de degradação ambiental. Nesse contexto, a integração entre dados de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento mostra-se essencial para subsidiar diagnósticos ambientais mais precisos e apoiar a tomada de decisão em políticas de conservação.

Introdução

A cobertura vegetal desempenha papel fundamental na manutenção do equilíbrio ambiental, influenciando a proteção do solo, o regime hídrico, a conservação da biodiversidade e a regulação do clima local e regional. No Brasil, as transformações na paisagem decorrentes da expansão agropecuária, do crescimento urbano e de outras formas de uso da terra têm promovido alterações significativas na configuração da vegetação nativa, especialmente em áreas inseridas no bioma Cerrado, considerado um dos mais ameaçados do país. Nesse contexto, o monitoramento das mudanças na cobertura vegetal torna-se essencial para subsidiar análises ambientais e orientar estratégias de conservação e planejamento territorial.

O bioma Cerrado é o segundo maior da América do Sul e está presente em todas as regiões brasileiras de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019). Conforme Ribeiro & Walter (2008), esse bioma abrange formações campestres, savânicas e florestais, conforme apresentado na Figura 1. Além disso, é considerado um hotspot mundial da biodiversidade, abrigando 12.829 espécies de plantas nativas catalogadas (BFG, 2021), e sofre intensa pressão pela perda de hábitat, especialmente em função do avanço das atividades agropecuárias.

Complementarmente, a região de Chapada dos Guimarães, localizada no estado de Mato Grosso, inserida no bioma Cerrado de acordo com a Figura 2, apresenta grande relevância ecológica, paisagística e hídrica, sendo instalada como unidade de conservação, APA, desde 1990. Essa condição reforça a importância de estudos voltados ao acompanhamento das transformações ambientais em sua área de abrangência.

Nesse cenário, o MapBiomas se apresenta como uma importante base de dados para análises multitemporais, disponibilizando series históricas de uso e cobertura do solo no território brasileiro. A partir dessas informações é possível identificar padrões e compreender a dinâmica da vegetação ao longo do tempo, bem como os principais processos de transformação da paisagem e seus possíveis impactos ambientais.

Assim, o presente estudo tem como objetivo analisar as mudanças na cobertura vegetal da região da Chapada dos Guimarães no período de 1985 e 2024, buscando compreender as principais transformações ocorridas e suas implicações para o meio ambiente e o ordenamento territorial.

Além da relevância ecológica, a Chapada dos Guimarães apresenta importância estratégica para a gestão ambiental, uma vez que sua cobertura vegetal contribui diretamente para a recarga hídrica, a estabilidade dos solos e a manutenção de fragmentos de vegetação nativa conectados a diferentes ambientes do Cerrado. A alteração desses padrões de cobertura pode comprometer funções ambientais essenciais, especialmente em áreas submetidas à pressão de diferentes formas de ocupação do território. Dessa forma, análises voltadas à dinâmica espacial da paisagem tornam-se fundamentais para compreender como o uso do solo influencia a conservação dos ambientes naturais.

Outro aspecto importante está relacionado à necessidade de monitoramento contínuo das transformações ambientais ao longo do tempo. Estudos multitemporais permitem identificar não apenas a perda de vegetação nativa, mas também a permanência de áreas conservadas e eventuais sinais de regeneração, oferecendo uma visão mais abrangente da paisagem. Esse tipo de abordagem é particularmente útil em regiões de transição e em áreas protegidas, onde coexistem interesses de conservação e de uso econômico do território.

Nesse contexto, o emprego de geotecnologias e de bases de dados como o MapBiomas se mostra especialmente vantajoso por possibilitar o acesso a séries históricas padronizadas, com boa resolução temporal e espacial. Isso favorece a elaboração de diagnósticos ambientais consistentes e comparáveis, além de reduzir a necessidade de levantamentos de campo extensivos. Assim, o presente estudo busca contribuir para o entendimento das transformações na cobertura vegetal da Chapada dos Guimarães, oferecendo subsídios para a reflexão sobre conservação ambiental, planejamento territorial e gestão sustentável da paisagem.

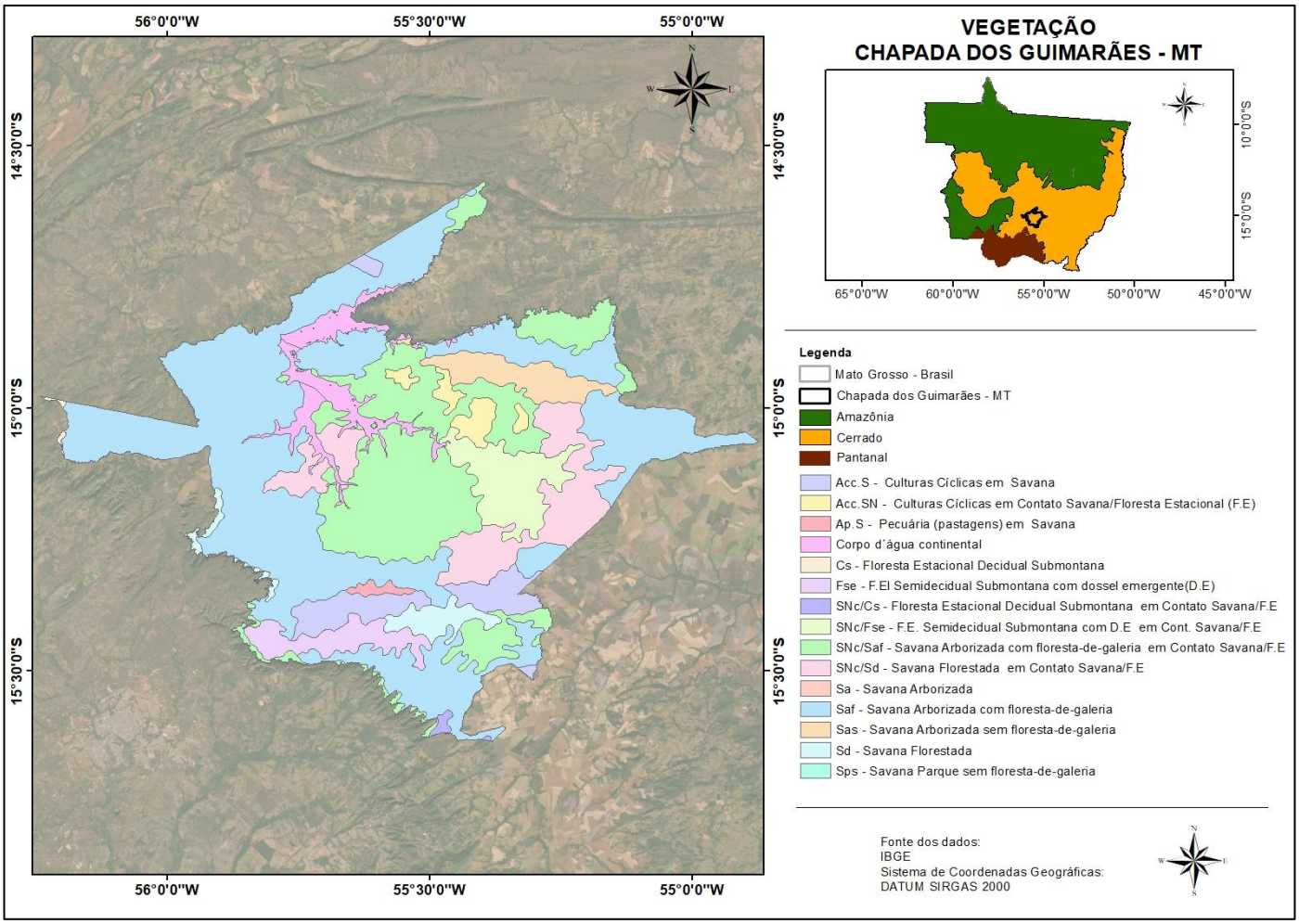


Figura 01: Mapa de vegetação de Chapada dos Guimarães-MT.
Fonte: Autor (2026).

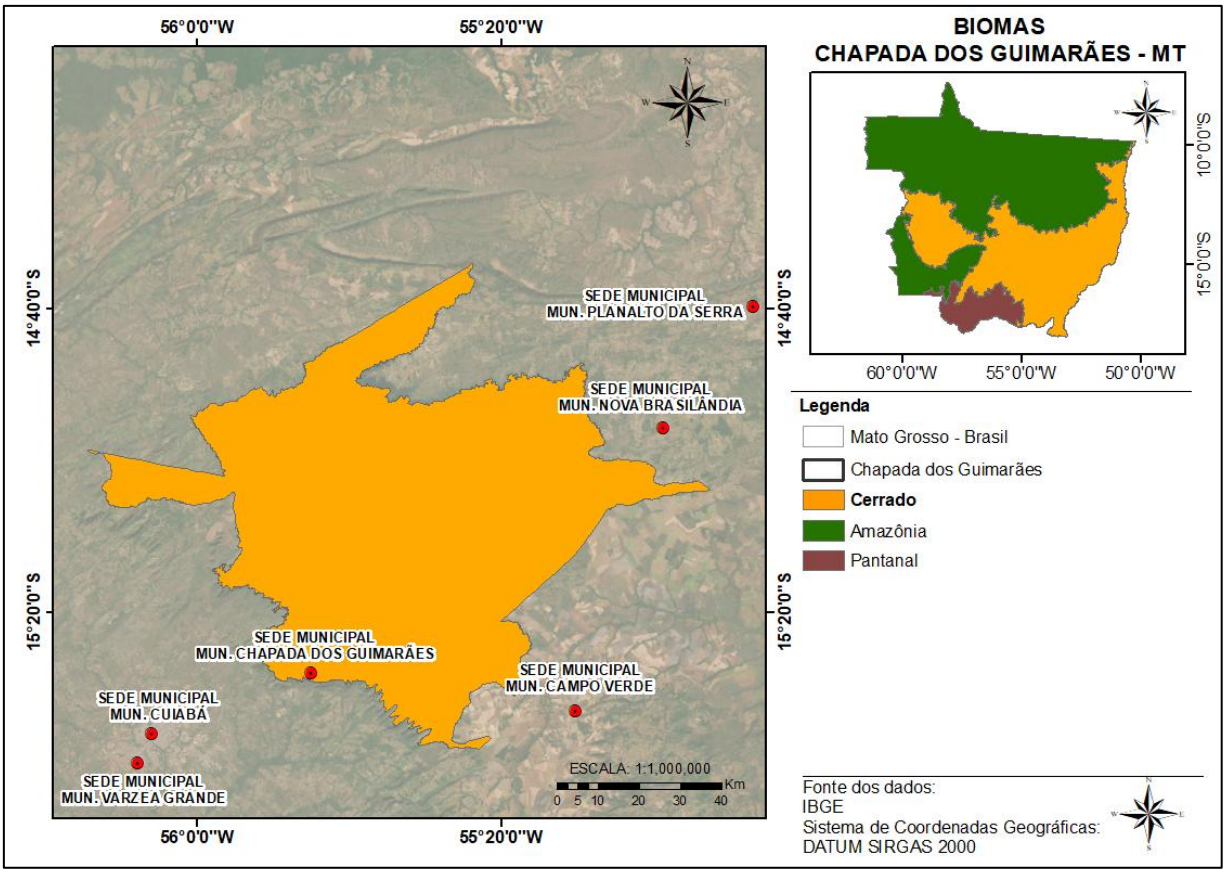


Figura 02: Mapa de bioma de Chapada dos Guimarães-MT.
Fonte: Autor (2026).

Materiais e Métodos

O estudo foi desenvolvido com base em dados secundários disponibilizados pela plataforma MapBiomas, que fornece informações anuais de uso e cobertura da terra no Brasil por meio de técnicas de sensoriamento remoto e processamento de imagens orbitais. A área de estudo compreende o município de Chapada dos Guimarães, localizado no estado de Mato Grosso, região inserida em um contexto ambiental de elevada relevância por apresentar expressiva diversidade de formações vegetais e intensa interação entre áreas naturais e usos antrópicos. Foram utilizados dados referentes ao período de 1985 e 2024, com extração de informações relativas às principais classes de uso e cobertura da terra, permitindo a observação da dinâmica temporal da paisagem ao longo de quase quatro décadas.

Os dados foram processados em ambiente de geoprocessamento utilizando o ArcGIS, no qual foram realizadas etapas de recorte espacial da área de estudo, organização das informações por classes e elaboração de mapas temáticos. Esse procedimento possibilitou a visualização espacial das mudanças ocorridas ao longo do período analisado, além de facilitar a comparação entre diferentes anos da série histórica. Para fins de análise, as classes foram agrupadas em categorias mais amplas, de modo a tornar a interpretação mais objetiva e evidenciar as principais tendências de transformação da cobertura vegetal e do uso do solo.

A análise consistiu na comparação temporal das classes de cobertura vegetal e uso do solo, identificando tendências de aumento ou redução ao longo do período estudado. Também foi observada a relação entre a redução de áreas com vegetação nativa e a expansão de usos associados às atividades agropecuárias, o que permitiu compreender de forma mais clara os processos de alteração da paisagem. Além disso, a utilização de dados multitemporais possibilitou identificar não apenas mudanças na quantidade das classes mapeadas, mas também a persistência de determinados padrões de ocupação territorial, evidenciando a importância do monitoramento contínuo para o entendimento da dinâmica ambiental da região.

Resultados e Discussões

A análise dos dados evidencia que a região da Chapada dos Guimarães apresenta predominância de formações savânicas, em consonância com as características do bioma Cerrado. Ao longo do período analisado, observou-se uma reorganização expressiva da cobertura da terra, marcada sobretudo pela expansão das atividades agropecuárias e pela consequente redução das áreas de vegetação nativa. Entre 1985 e 2024, a cobertura natural sofreu decréscimo significativo, passando de aproximadamente 90% para 60% da área total, o que indica uma mudança importante na dinâmica de ocupação e uso do território. Esse processo esteve associado à conversão de formações florestais e savânicas em usos antrópicos, com destaque para o avanço das pastagens, que se consolidaram como uma das principais classes de substituição da vegetação original.

A Tabela 01 sintetiza a evolução da cobertura da terra no período estudado. Verificou-se, ainda, que a redução da vegetação natural ocorreu de forma desigual ao longo da série temporal, com momentos de maior intensificação da substituição da cobertura original e períodos de relativa estabilidade. Paralelamente, observou-se aumento gradual das áreas destinadas à pastagem e à agricultura, evidenciando a intensificação do uso humano do território, especialmente nas últimas décadas. Esse padrão de transformação reflete a pressão exercida pela expansão da fronteira agrícola no estado de Mato Grosso, processo historicamente associado à conversão de áreas naturais em espaços produtivos.

Apesar desse cenário de substituição da vegetação nativa, também foram identificadas áreas de estabilidade e, em menor escala, indícios de regeneração da cobertura vegetal, o que demonstra a complexidade da dinâmica ambiental na região. Esses remanescentes e processos de recuperação parcial indicam que, embora o avanço antrópico seja predominante, ainda existem áreas com potencial ecológico relevante para manutenção da conectividade da paisagem e conservação da biodiversidade. Em conjunto, os resultados reforçam que as transformações observadas não se limitam a mudanças pontuais na paisagem, mas expressam um processo contínuo de reestruturação territorial, com impactos diretos sobre a conservação ambiental, o equilíbrio ecológico e o planejamento do uso do solo.

Classes	1985	2024
Vegetação Natural (Florestal + Savânica)	594.750 ha	407.996 ha
Uso Agropecuário	58.650 ha	218.846 ha

Tabela 01: Evolução da cobertura vegetal (em ha).
Fonte: Adaptado de MapBiomas (2026).

Os maiores incrementos de uso antrópico foram observados após a criação da Área de Proteção Ambiental (APA), em 1990, evidenciando a intensificação da pressão sobre a cobertura vegetal da região. Esse padrão é semelhante ao verificado em outras áreas de Mato Grosso, onde a expansão agropecuária promoveu mudanças expressivas na paisagem. Embora as fitofisionomias do Cerrado apresentem certa resiliência a distúrbios como o fogo e a conversão do uso da terra, a continuidade dessa pressão pode comprometer a manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos associados.

Nas Figuras 03 e 04, observa-se a transição espacial da cobertura da terra ao longo do tempo, evidenciando a substituição progressiva de áreas naturais por usos antrópicos.

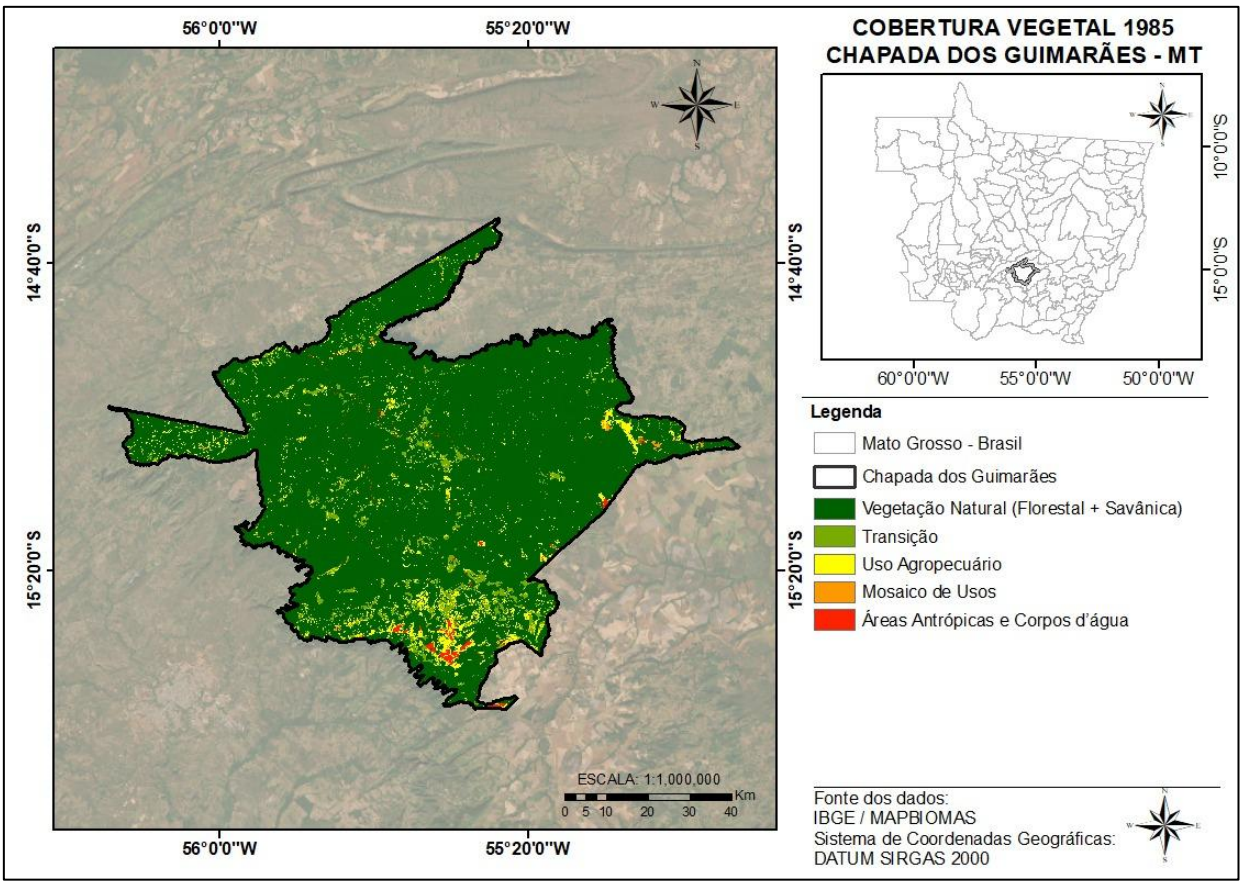


Figura 03: Mapa de mudanças na cobertura vegetal (1985).
Fonte: MapBiomas.

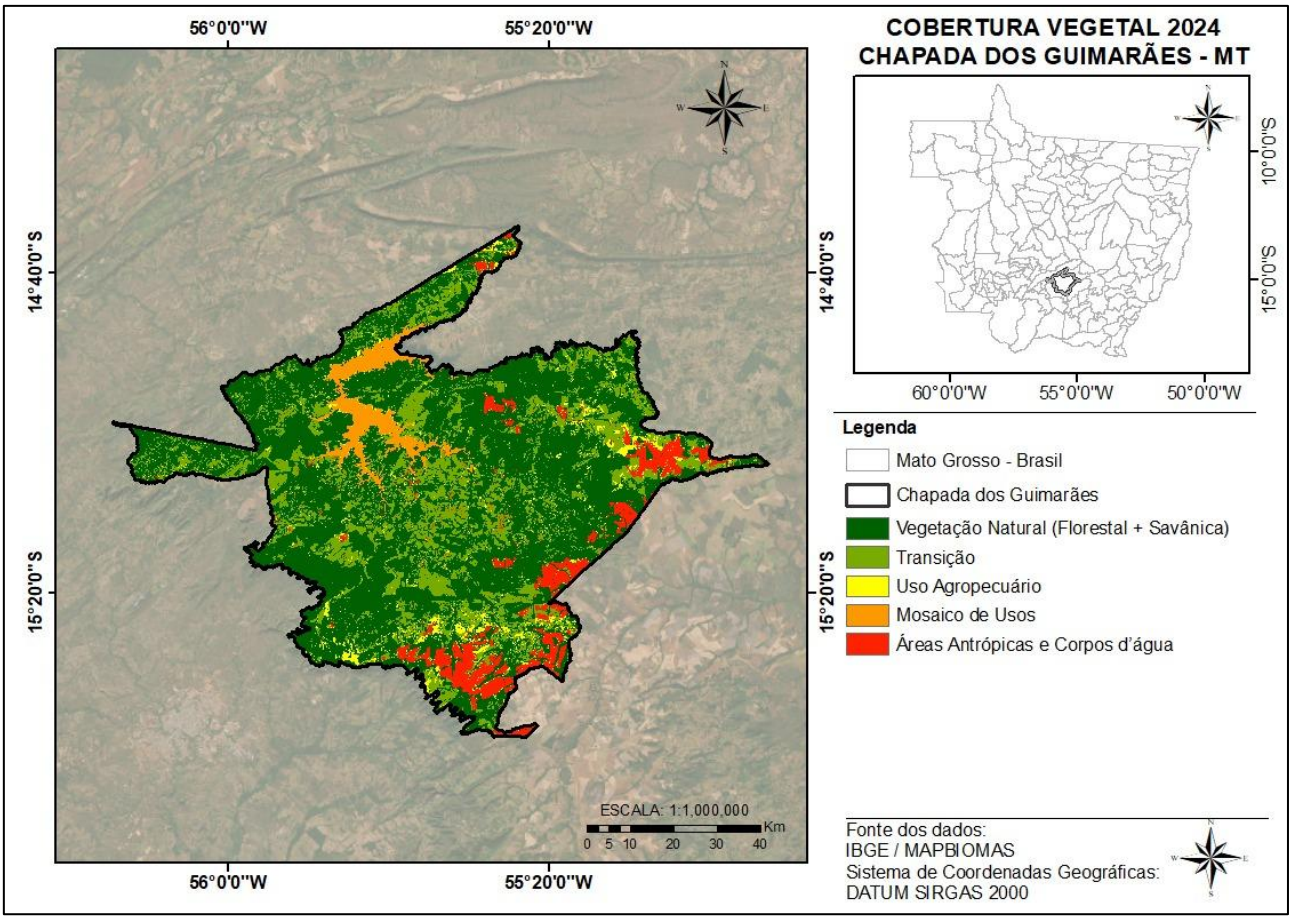


Figura 04: Mapa de mudanças na cobertura vegetal (2024).
Fonte: MapBiomas.

A análise cartográfica das Figuras 03 e 04 permite observar, de forma mais detalhada, a distribuição espacial das classes de uso e cobertura da terra, evidenciando que as mudanças não ocorreram de maneira uniforme na área de estudo. Nota-se que a conversão da vegetação nativa para usos antrópicos se concentrou em determinadas porções do território, indicando padrões espaciais associados à acessibilidade, relevo e aptidão agrícola. Além disso, os mapas permitem identificar a fragmentação da vegetação natural, com a redução de áreas contínuas e o aumento de manchas isoladas, o que pode comprometer a conectividade ecológica. Dessa forma, a análise espacial complementa os dados quantitativos apresentados, permitindo uma compreensão mais abrangente da dinâmica da paisagem ao longo do período estudado.

Considerações Finais

A análise dos dados indica que a região da Chapada dos Guimarães é marcada pela predominância de formações savânicas, em consonância com as características do bioma Cerrado. Ao longo do período analisado, observou-se uma dinâmica expressiva na cobertura vegetal, associada principalmente à expansão das atividades agropecuárias.

Verificou-se redução de áreas de vegetação natural em diferentes momentos da série temporal, acompanhada pelo aumento das classes de pastagem e agricultura. Esse padrão evidencia a intensificação do uso antrópico do território, especialmente nas últimas décadas.

Apesar desse cenário de substituição da vegetação nativa, também foram identificadas áreas de estabilidade e, em menor escala, indícios de regeneração da cobertura vegetal, o que demonstra a complexidade da dinâmica ambiental na região. Em conjunto, esses resultados refletem a pressão exercida pela expansão da fronteira agrícola em Mato Grosso, com impactos diretos sobre a estrutura da paisagem.

Agradecimentos

Os autores agradecem, inicialmente, à Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) e à coordenação do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA-UFMT), pelo apoio e incentivo à formação acadêmica. Em especial, manifestam reconhecimento ao suporte institucional e financeiro, que possibilitou a participação presencial no congresso, proporcionando uma valiosa experiência de aprendizado, integração acadêmica e crescimento profissional aos discentes.

Referências Bibliográficas

BFG (The Brazil Flora Group) 2021. Flora do Brasil 2020. 1-28 pp. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. http://doi.org/10.47871/jbrj2021001.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2019. Biomas e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000. Rio de Janeiro, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 168 p. (Relatórios metodológicos, v. 45).

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomas – Coleção 10 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil (1985–2024). Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/. Acesso em: 2026.

RIBEIRO, J.F. & WALTER, B.M.T. 2008. As principais fitofisionomias do Bioma Cerrado. In Cerrado: ecologia e flora (S.M. Sano, S.P. Almeida & J.F. Ribeiro, eds.). Embrapa Cerrados, Planaltina. p.151 -212.

USO DE GEOTECNOLOGIAS NA ANÁLISE DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA E IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS NA BACIA DO RIO UNA (PE)

1 Clarissa Neta Conceição Pereira da Silva, 2 Ioneide Alves de Souza
1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: clarissa.neta@ufrpe.br; 2 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail:ioneide.alves@gmail.com

Palavras-chave: Geotecnologias; Variabilidade climática; Bacia hidrográfica

Resumo

A análise da variabilidade climática em bacias hidrográficas constitui um elemento essencial para a compreensão da dinâmica ambiental e hidrológica em escala regional. Neste contexto, foi realizada a espacialização de variáveis climáticas e morfométricas na Bacia Hidrográfica do Rio Una (PE), utilizando geotecnologias aplicadas ao tratamento e análise de dados ambientais.Foram empregadas séries históricas de dados meteorológicos, posteriormente interpoladas pelo método Inverse Distance Weighting (IDW), possibilitando a geração de superfícies contínuas de distribuição espacial. A caracterização do relevo baseou-se em dados da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), a partir dos quais foram elaborados o Modelo Digital de Elevação (MDE) e o mapa de declividade. Os resultados indicaram a presença de gradiente pluviométrico no sentido leste-oeste, associado à influência da maritimidade e de sistemas atmosféricos regionais, bem como variações térmicas condicionadas por fatores topográficos e proximidade com o oceano. A análise morfométrica evidenciou a compartimentação do relevo, com predomínio de maiores declividades nas porções interiores da bacia. A integração dos dados permitiu identificar padrões espaciais que condicionam a organização dos processos hidrológicos, destacando a aplicabilidade das geotecnologias como suporte à análise ambiental.

Introdução

As bacias hidrográficas constituem unidades fundamentais de análise ambiental, uma vez que integram, de forma sistêmica, componentes físicos e bióticos, tais como clima, relevo, solo, cobertura vegetal e rede de drenagem. Essa abordagem integrada possibilita a compreensão da dinâmica dos processos naturais, bem como das interações entre os elementos do meio físico e as intervenções antrópicas. Nesse sentido, as bacias são amplamente utilizadas como unidades de planejamento e gestão ambiental, especialmente no contexto da gestão de recursos hídricos, por permitirem a avaliação conjunta dos fatores que condicionam a disponibilidade e a qualidade da água (Ross, 2019; ANA, 2011).

Dentre os principais fatores que influenciam o funcionamento dessas unidades, destacam-se as variáveis climáticas, em especial a precipitação pluviométrica e a temperatura do ar. Tais elementos exercem papel determinante no controle do regime hidrológico, interferindo diretamente no balanço hídrico e em processos como evapotranspiração, infiltração e escoamento superficial (Tucci; Pereira, 2002; Tucci, 2009). Além disso, a variabilidade espaço-temporal dessas variáveis condiciona a dinâmica ambiental das bacias hidrográficas, influenciando desde a recarga de aquíferos até a ocorrência de eventos extremos, como secas e enchentes (Ward; Robinson, 2000).

No estado de Pernambuco, a distribuição espacial dessas variáveis climáticas apresenta elevada heterogeneidade, resultante da interação entre fatores geográficos e atmosféricos, como o relevo, a proximidade com o oceano (maritimidade) e a atuação de sistemas atmosféricos regionais. Essa variabilidade é particularmente evidente entre as diferentes mesorregiões do estado, refletindo-se em distintos padrões de precipitação e temperatura (INMET, 2020; Nóbrega et al., 2015). Nesse contexto, a Bacia Hidrográfica do Rio Una, localizada na Zona da Mata Sul pernambucana, destaca-se por apresentar elevados índices pluviométricos e condições térmicas específicas, que influenciam diretamente sua dinâmica ambiental. Esses fatores impactam a disponibilidade hídrica, a suscetibilidade à ocorrência de enchentes e as formas de uso e ocupação do solo na região (CPRM, 2005; IBGE, 2022).

Diante disso, o uso de geotecnologias, especialmente os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), tem se mostrado fundamental para o monitoramento ambiental e a análise espacial de variáveis climáticas, permitindo a integração de dados e a geração de mapas temáticos (Câmara; Davis; Monteiro, 2001; Longley et al., 2013). Assim, o presente estudo tem como objetivo analisar a variabilidade espacial de variáveis climáticas na Bacia do Rio Una (PE), com ênfase na precipitação e temperatura, considerando a influência das características do relevo, por meio da aplicação de geotecnologias, contribuindo para o planejamento ambiental e a gestão dos recursos hídricos.

Material e Métodos

A área de estudo compreende a Bacia Hidrográfica do Rio Una, localizada na Zona da Mata Sul do estado de Pernambuco, abrangendo o município de Barreiros, cuja localização está apresentada na Figura 1. Essa região apresenta características climáticas marcadas por elevados índices pluviométricos e temperaturas relativamente altas ao longo do ano, além de relevo predominantemente de baixa altitude em sua porção litorânea, com gradativa elevação em direção às porções mais interiores da bacia, fatores que influenciam diretamente a dinâmica hidrológica e ambiental (CPRM, 2005; IBGE, 2022).

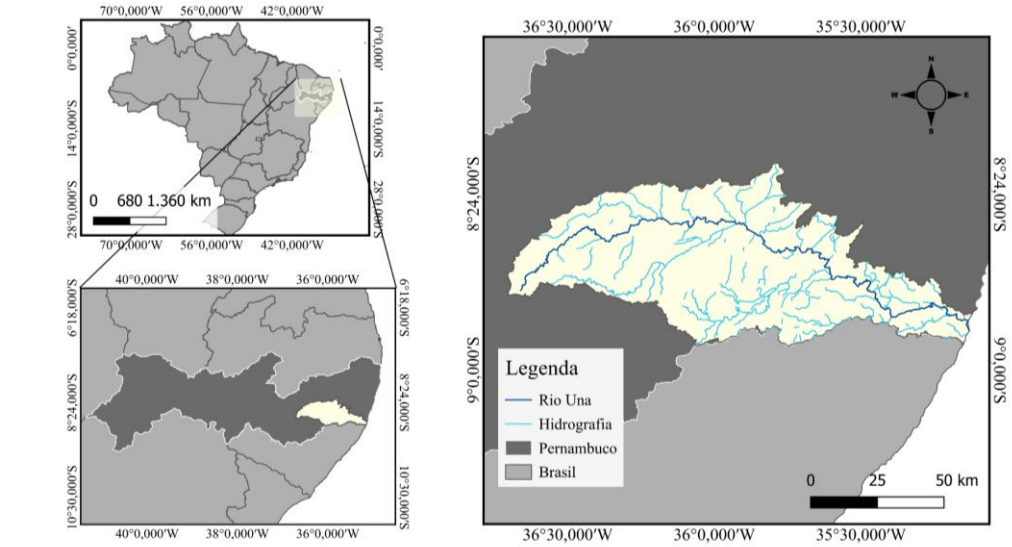


Figura 01: Localização da área de estudo.
Fonte: A autora (2026)

Os dados climatológicos utilizados consistem em séries históricas de precipitação anual e temperatura do ar (média, máxima e mínima), obtidas de estações meteorológicas no estado de Pernambuco. Inicialmente, foi realizada a organização, padronização e verificação da consistência dos dados, visando minimizar possíveis inconsistências e lacunas nas séries temporais. Posteriormente, essas informações foram georreferenciadas, permitindo sua espacialização em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), o que garante maior confiabilidade na análise da variabilidade climática regional (INMET, 2020; Barry; Chorley, 2010).

O processamento e a análise dos dados espaciais foram realizados no software QGIS (QGIS Development Team, 2023), amplamente utilizado em estudos ambientais por sua capacidade de manipulação, análise e visualização de dados geográficos (Longley et al., 2015). Inicialmente, foram utilizadas bases cartográficas vetoriais para a delimitação da área de estudo, incluindo o recorte da Bacia do Rio Una e a definição dos limites municipais. O sistema de referência adotado foi o SIRGAS 2000 (IBGE, 2015), padrão oficial para dados geoespaciais no Brasil, garantindo a compatibilidade e integração entre os diferentes conjuntos de dados utilizados. Para a espacialização das variáveis climáticas, foi aplicado o método de interpolação por Ponderação da Distância Inversa (Inverse Distance Weighting – IDW), que estima valores em locais não amostrados com base na proximidade dos pontos conhecidos, atribuindo maior peso aos dados mais próximos (Goodchild; Fu; Rich, 2019). Esse método é amplamente empregado em estudos climatológicos e ambientais por sua simplicidade computacional e eficiência na representação de superfícies contínuas, sendo adequado para análises em escala regional.

A caracterização do relevo foi realizada a partir de dados altimétricos da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com resolução espacial de aproximadamente 30 metros, possibilitando a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) com nível de detalhamento compatível com estudos ambientais regionais (Farr et al., 2007). A partir do MDE, foram derivados parâmetros morfométricos, como altitude e declividade, permitindo a análise da variabilidade do relevo e sua influência na distribuição espacial das variáveis climáticas. O mapa de declividade foi obtido por meio do processamento do gradiente altimétrico, evidenciando a variação da inclinação do terreno ao longo da bacia.

Por fim, os mapas temáticos de precipitação, temperatura e relevo foram organizados e padronizados no ambiente SIG, seguindo critérios cartográficos de legibilidade, hierarquia visual e coerência na representação espacial. A integração desses produtos possibilitou a análise conjunta das variáveis ambientais, contribuindo para a compreensão da variabilidade climática e de suas relações com os condicionantes físicos da Bacia do Rio Una (Kent; Vujakovic, 2020).

Resultados e Discussão

Variabilidade Espacial da Precipitação

A distribuição espacial da precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Una apresenta variações significativas, refletindo a influência de fatores como relevo, proximidade com o litoral e atuação de sistemas atmosféricos regionais. Conforme observado na Figura 2, os maiores índices pluviométricos concentram-se nas porções mais próximas da faixa litorânea, enquanto valores progressivamente menores são registrados em direção ao interior da bacia.

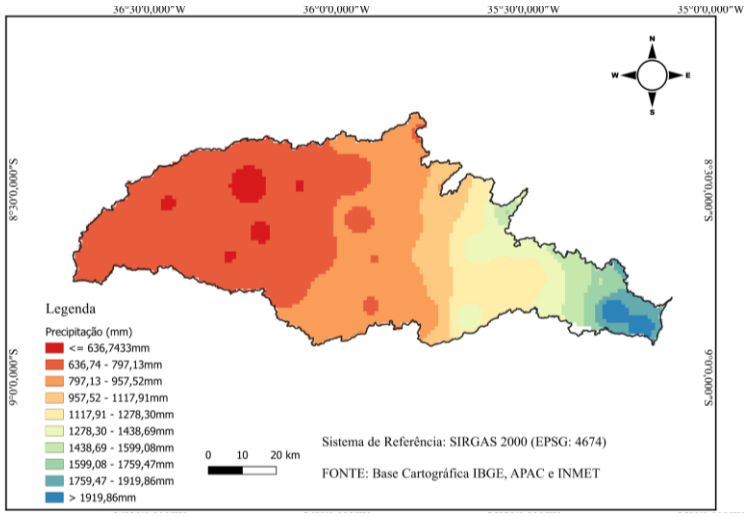


Figura 02: Distribuição espacial da precipitação anual na Bacia do Rio Una (PE).
Fonte: A autora (2026)

O mapa demonstra que a presença de um gradiente pluviométrico no sentido leste-oeste, com redução dos totais anuais de precipitação à medida que se avança para áreas mais interiores da bacia. Esse comportamento está diretamente relacionado à influência da maritimidade, que favorece maiores volumes de chuva nas áreas mais próximas ao oceano, bem como à atuação de sistemas atmosféricos como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e os Distúrbios Ondulatórios de Leste, responsáveis por grande parte das precipitações na região Nordeste do Brasil (Marengo et al., 2011; Nóbrega et al., 2015). Além disso, áreas com maiores índices pluviométricos tendem a apresentar maior geração de fluxos hídricos e maior variabilidade na resposta hidrológica, podendo intensificar a ocorrência de eventos extremos, como enxurradas e inundações. Esse comportamento torna-se ainda mais relevante quando associado às características do relevo da bacia, analisadas nas seções seguintes, que influenciam diretamente a dinâmica do escoamento. Por outro lado, áreas com menores volumes de precipitação apresentam menor disponibilidade hídrica, impactando o balanço hídrico da bacia e a manutenção dos recursos hídricos (Beven, 2012; IPCC, 2021; Silveira, 2001).

Nesse sentido, a variabilidade espacial da precipitação na Bacia do Rio Una evidencia a importância da análise climatológica integrada, permitindo compreender os padrões de distribuição das chuvas e suas implicações na dinâmica ambiental e hidrológica da bacia.

Distribuição Espacial da Temperatura do Ar

A distribuição espacial da temperatura média na Bacia Hidrográfica do Rio Una apresenta variações associadas principalmente à altitude, à proximidade com o litoral e à incidência de radiação solar. Conforme observado na Figura 3, as áreas de menor altitude, especialmente nas porções mais próximas da faixa litorânea, tendem a apresentar temperaturas mais elevadas, enquanto regiões mais interiores e com maiores altitudes registram valores térmicos mais amenos.

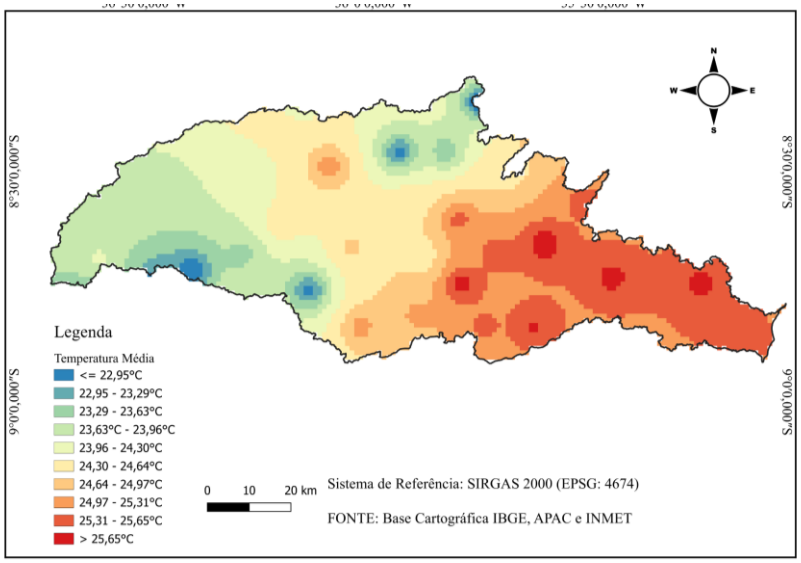


Figura 03: Distribuição espacial da temperatura média na Bacia do Rio Una (PE).
Fonte: A autora (2026)

A análise do padrão térmico evidencia que a variabilidade espacial da temperatura na bacia resulta da interação entre múltiplos fatores geográficos e atmosféricos. A proximidade com o oceano Atlântico exerce papel fundamental na regulação térmica, promovendo maior estabilidade das temperaturas por meio da atuação das brisas marítimas e da elevada capacidade térmica da água, que reduz a amplitude térmica nas áreas costeiras. Em contrapartida, setores mais interiorizados da bacia, menos influenciados pela maritimidade, tendem a apresentar maior continentalidade, refletida em temperaturas mais elevadas e maior variabilidade térmica (IPCC, 2021). Além disso, a dinâmica das massas de ar, especialmente as de origem tropical, contribui para a manutenção de temperaturas elevadas em determinadas porções da bacia. A distribuição da radiação solar, condicionada por fatores como orientação do relevo, cobertura do solo e uso e ocupação da terra, também desempenha papel relevante na diferenciação térmica espacial, influenciando diretamente os processos de absorção, armazenamento e reemissão de energia na superfície terrestre (Ayoade, 2010; Arnfield, 2021).

Caracterização Altimétrica da Bacia

A caracterização altimétrica da Bacia Hidrográfica do Rio Una foi realizada por meio do Modelo Digital de Elevação (MDE), apresentado na Figura 4, obtido a partir de dados da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). O MDE permite a representação contínua das variações de altitude na área de estudo, constituindo uma ferramenta fundamental para a análise do relevo em escala regional (Valeriano, 2008; Florenzano, 2011).

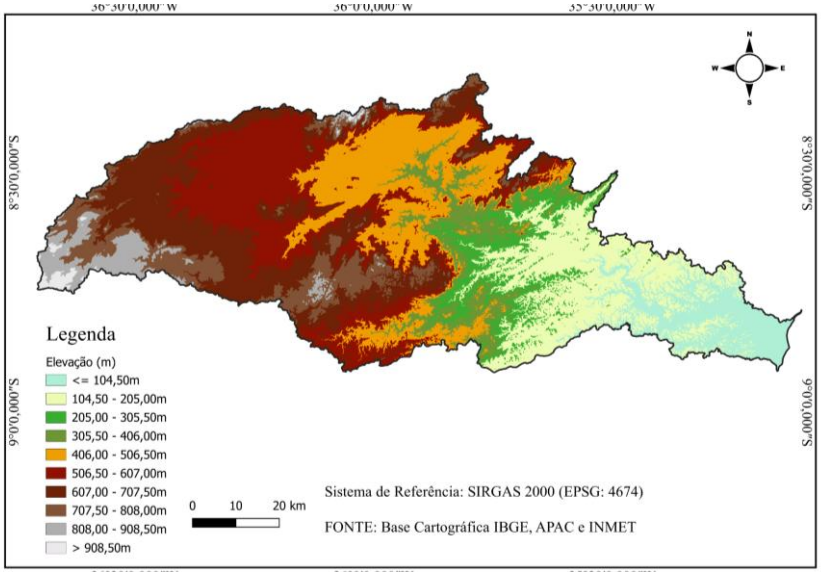


Figura 4: Modelo Digital de Elevação da Bacia do Rio Una (PE).
Fonte: A autora (2026)

A análise altimétrica evidencia a existência de compartimentação altimétrica na bacia, com predomínio de cotas mais elevadas nas porções oeste e noroeste, enquanto as menores altitudes concentram-se na porção leste, em direção à zona costeira. Esse padrão é compatível com estudos realizados em bacias hidrográficas do Nordeste, nos quais a variação altimétrica está diretamente relacionada à organização da rede de drenagem e à dinâmica dos processos geomorfológicos (Silva et al., 2018; Lima; Santos, 2020).

Do ponto de vista geomorfológico, a variabilidade altimétrica observada reflete diferentes níveis de dissecação do relevo, associados à evolução da drenagem e à atuação de processos erosivos ao longo do tempo. A utilização do MDE em ambiente SIG permite não apenas a visualização dessas variações, mas também a extração de parâmetros morfométricos que subsidiam análises mais detalhadas da dinâmica da bacia, como declividade, orientação de vertentes e áreas de convergência topográfica (Li; Zhu; Gold, 2020; Zhang; Montgomery, 2020; Wilson; Gallant, 2000).

Além disso, o MDE constitui uma base essencial para modelagens ambientais e hidrológicas, possibilitando a simulação de fluxos e a delimitação de áreas de contribuição, bem como a identificação de zonas suscetíveis a riscos, como processos erosivos e inundações. Essas análises são potencializadas pelo uso de geotecnologias, especialmente os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que permitem o processamento, integração e análise espacial dos dados altimétricos de forma automatizada e precisa. A partir dessas aplicações, torna-se possível realizar análises preditivas da dinâmica da bacia, auxiliando na compreensão do comportamento hidrológico e na antecipação de eventos críticos. Nesse contexto, o uso do MDE, associado às ferramentas de SIG, contribui significativamente para o planejamento ambiental e a gestão dos recursos hídricos, ao subsidiar a tomada de decisão com base em dados espaciais e na modelagem dos processos naturais (Zhang; Montgomery, 2020; Li; Zhu; Gold, 2020).

Análise da Declividade e Compartimentação do Relevo

Entre os parâmetros morfométricos derivados do Modelo Digital de Elevação, a declividade destaca-se como um dos principais indicadores da dinâmica superficial da bacia, por representar a variação do relevo em relação à distância horizontal.

A partir do processamento do MDE em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), foi possível gerar o mapa de declividade da Bacia do Rio Una, apresentado na Figura 5, permitindo a classificação das formas de relevo conforme o grau de inclinação do terreno (Florenzano, 2011)

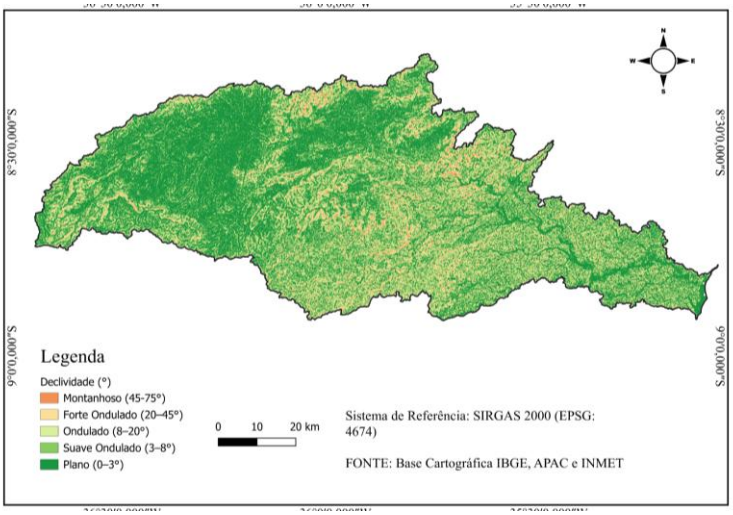


Figura 05: Distribuição espacial da declividade da Bacia Hidrográfica do Rio Una (PE).
Fonte: A autora (2026)

A análise evidencia o predomínio de áreas com relevo plano a suave ondulado (0–8°), distribuídas principalmente nas porções centrais e leste da bacia, enquanto classes de maior declividade, como ondulado a forte ondulado (8–45°), ocorrem de forma mais concentrada nas regiões oeste e noroeste. As áreas classificadas como montanhosas (acima de 45°) são menos expressivas e aparecem de forma pontual, associadas a setores de maior dissecação do relevo.

Essa distribuição espacial da declividade indica uma diferenciação geomorfológica interna da bacia, refletindo a atuação de processos erosivos e a evolução da rede de drenagem. Em termos morfodinâmicos, áreas com menores declividades tendem a apresentar maior potencial de infiltração e acúmulo de água, enquanto regiões mais inclinadas favorecem o escoamento superficial mais rápido, influenciando diretamente a redistribuição dos fluxos hídricos na paisagem (Leite et al., 2020; Costa et al., 2023).

Além disso, a declividade exerce forte influência sobre os processos de uso e ocupação do solo, uma vez que áreas de relevo plano a suavemente ondulado tendem a ser mais favoráveis à expansão agrícola e urbana, devido à maior estabilidade do terreno e facilidade de mecanização. Em contrapartida, regiões com maiores inclinações apresentam limitações ao uso antrópico, sobretudo em função do aumento da suscetibilidade a processos erosivos, perda de solo e instabilidade de encostas, especialmente quando associadas à remoção da cobertura vegetal (Gomes et al., 2021). A relação entre declividade e precipitação também se mostra fundamental na compreensão da dinâmica ambiental da bacia. Setores que combinam maiores declividades com elevados índices pluviométricos tendem a apresentar maior energia hidrológica, o que favorece a intensificação de processos erosivos e o transporte de sedimentos (Amaro et al., 2021). Por outro lado, áreas com baixa declividade e alta precipitação podem favorecer o acúmulo de água no terreno, aumentando a suscetibilidade à ocorrência de inundações e alagamentos, evidenciando diferentes respostas hidrológicas ao longo da bacia (Araújo et al., 2024). Do ponto de vista geomorfológico, a declividade está diretamente associada à energia do relevo, controlando a intensidade dos processos de dissecação e transporte de sedimentos. Áreas mais íngremes apresentam maior capacidade de remoção de material, enquanto setores mais planos tendem a atuar como zonas de deposição, contribuindo para a organização espacial dos processos morfogenéticos (Araújo et al., 2024).

Dessa forma, a análise da declividade, integrada ao MDE, constitui uma etapa fundamental em estudos ambientais, pois permite identificar áreas com diferentes comportamentos hidrológicos e geomorfológicos, bem como zonas de maior fragilidade ambiental. Dessa forma, esse parâmetro torna-se essencial para o planejamento territorial e a gestão dos recursos hídricos, subsidiando a definição de áreas prioritárias para conservação, uso sustentável e mitigação de riscos naturais (Teng et al., 2020).

Considerações Finais

As análises realizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Una (PE) evidenciaram a importância da integração entre variáveis climáticas e morfométricas para a compreensão da dinâmica ambiental em escala regional. A espacialização da precipitação demonstrou a presença de um gradiente pluviométrico no sentido leste-oeste, com maiores índices nas áreas próximas ao litoral, influenciados pela maritimidade e pela atuação de sistemas atmosféricos regionais. Em relação à temperatura do ar, observou-se uma variação espacial condicionada principalmente pela altitude e pela proximidade com o oceano, com valores mais elevados nas áreas de menor altitude e maior estabilidade térmica nas regiões costeiras.

A análise do relevo, por meio do Modelo Digital de Elevação e do mapa de declividade, evidenciou a compartimentação geomorfológica da bacia, com predomínio de áreas planas a suavemente onduladas nas porções leste e centrais, e maiores declividades nas regiões interiores. Essa configuração influencia diretamente a dinâmica ambiental, especialmente no que se refere

à distribuição dos processos erosivos, ao transporte de sedimentos e à suscetibilidade a diferentes respostas hidrológicas ao longo da bacia. Destaca-se que o uso de geotecnologias, especialmente os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e dados altimétricos oriundos da missão SRTM, foi fundamental para a integração, processamento e análise das variáveis estudadas, permitindo a geração de produtos cartográficos que evidenciam padrões espaciais e subsidiam a interpretação dos processos ambientais.

De forma integrada, os resultados demonstram que a interação entre relevo e variáveis climáticas condiciona diferentes respostas ambientais, evidenciando áreas com maior potencial de vulnerabilidade e outras mais favoráveis ao uso antrópico. Nesse contexto, o uso de geotecnologias mostrou-se uma ferramenta eficiente para o suporte ao planejamento ambiental e à gestão dos recursos hídricos na região, contribuindo para a tomada de decisão baseada em dados espaciais.

Agradecimentos

A autora agradece à instituição de ensino pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho e pelo suporte acadêmico oferecido. Agradece aos docentes do curso de Engenharia Ambiental pelos conhecimentos compartilhados e, em especial, à professora orientadora pelo apoio, orientação e incentivo ao longo da elaboração deste estudo.

Referências Bibliográficas

AMARO, V. E. et al. Avaliação da suscetibilidade do solo à erosão nas falésias do litoral oriental do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 22, n. 1, 2021.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: relatório pleno.** Brasília: ANA, 2011.

ARABAMERI, A. et al. Spatial modelling of flood susceptibility using machine learning models and GIS. **Science of The Total Environment**, v. 764, p. 142879, 2021.

ARAÚJO, M. M. F. et al. Modelagem da erosão hídrica do solo no Brasil: uma revisão sobre os principais métodos e modelos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 18, n. 5, p. 3948–3967, 2024.

ARNFIELD, A. John. **Urban Climate. Cambridge:** Cambridge University Press, 2021.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos.** 15. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosphere, Weather and Climate.** 9. ed. London: Routledge, 2010.

BEVEN, Keith. **Rainfall-Runoff Modelling: The Primer.** 2. ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2012.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação.** São José dos Campos: INPE, 2001.

COSTA, L. F. et al. Análise da declividade e sua influência na dinâmica hidrológica em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 1, p. 120–135, 2023.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Diagnóstico da Bacia Hidrográfica do Rio Una – Pernambuco.** Recife: CPRM, 2005.

FARR, T. G. et al. **The Shuttle Radar Topography Mission.** Reviews of Geophysics, v. 45, 2007.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais.** São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

GOMES, D. J. C. et al. Vulnerabilidade à erosão hídrica do solo em bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 2, p. 816–833, 2021.

GOODCHILD, M. F.; FU, P.; RICH, P. **Geographic Information Science and Systems.** 4. ed. Hoboken: Wiley, 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Base de informações geográficas e estatísticas sobre o território brasileiro.** Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados: Barreiros (PE).** Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br. Acesso em: 23 abr. 2026.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados: Pernambuco**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br. Acesso em: 23 abr. 2026.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – SIRGAS 2000.** Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas do Brasil (1981–2010).** Brasília: INMET, 2020.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis.** Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

KENT, A. J.; VUJAKOVIC, P. **The Routledge Handbook of Mapping and Cartography.** London: Routledge, 2020.

LEITE, M. E. et al. Relação entre declividade e processos hidrológicos em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, p. 1–12, 2020.

LI, Zhilin; ZHU, Qing; GOLD, Christopher. **Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology.** Boca Raton: CRC Press, 2020.

LIMA, J. R. S.; SANTOS, C. A. G. Análise morfométrica de bacias hidrográficas no Nordeste brasileiro utilizando SIG. **Revista Brasileira de Geomorfologia,** v. 21, n. 2, p. 345–360, 2020.

LONGLEY, P. A. et al. **Geographical Information Systems and Science.** 3. ed. Chichester: Wiley, 2013.

MARENGO, José A. et al. Variabilidade e mudanças climáticas no Brasil e na América do Sul. In: CAVALCANTI, Iracema F. A. et al. (org.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

NÓBREGA, R. S. et al. **Variabilidade climática e sua influência na precipitação em Pernambuco.** Revista Brasileira de Climatologia, v. 17, p. 123–135, 2015.

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System.** Open Source Geospatial Foundation Project, 2023.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento.** 9. ed. São Paulo: Contexto, 2019.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. **Ecogeografia do Brasil: subsídios para planejamento ambiental**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

SILVA, R. M. et al. Análise morfométrica de bacias hidrográficas no Nordeste do Brasil. ***Revista Brasileira de Geografia Física*****,** v. 11, n. 2, p. 456–470, 2018.

SILVEIRA, André Luiz Lopes da. Hidrologia aplicada. In: TUCCI, Carlos E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001.

TENG, H. et al. Current and future assessments of soil erosion by water on a global scale: a review. *Earth-Science Reviews*, v. 209, p. 103–120, 2020.

TUCCI, C. E. M.; PEREIRA, M. A. **Hidrologia: ciência e aplicação.** Porto Alegre: UFRGS, 2002.

TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

VALERIANO, Márcio de Morisson. **Topodata: guia para utilização de dados geomorfométricos locais**. São José dos Campos: INPE, 2008.

WARD, R. C.; ROBINSON, M. **Principles of Hydrology.** 4. ed. London: McGraw-Hill, 2000.

WILSON, John P.; GALLANT, John C. (org.). **Terrain Analysis: Principles and Applications**. New York: John Wiley & Sons, 2000.

ZHANG, Wen; MONTGOMERY, David R. Digital elevation model-based analysis of terrain and hydrological processes: advances and applications. **Earth-Science Reviews**, v. 210, p. 103–120, 2020.

MODELAGEM ESPACIAL APLICADA A UNIVERSALIZAÇÃO DO ESGOTAMENTO SANITÁRIO DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA COM USO DE MACHINE LEARNING

1 Bruno Pereira Toniolo, 2 Roberto Wagner Lourenço, 3 Darllan Collins da Cunha e Silva, 4 Rogério Inoue Ueda

1 Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, bruperton.cad@gmail.com; 2 Universidade Estadual de São Paulo – Unesp Sorocaba, roberto.lourenco@unesp.br; 3 Universidade Estadual de São Paulo – Unesp Sorocaba, darllan.collins@unesp.br, 4 Technati Desenhos

Palavras-chave: Saneamento básico; Geoprocessamento; Máquina de Vetores de Suporte.

Resumo

A universalização do esgotamento sanitário constitui um dos principais desafios do saneamento básico no Brasil, especialmente em áreas urbanas periféricas. Neste estudo, aplicou-se a máquina de vetores de suporte (Support Vector Machine – SVM), disponível no software TerrSet, para simular a cobertura de coleta e tratamento de esgoto na Bacia Hidrográfica do rio Cotia (SP), com foco na identificação de variáveis determinantes e no apoio ao planejamento setorial. Foram utilizados 17 preditores de natureza física, socioeconômica e operacional. O modelo foi calibrado por meio de grid search, com kernel radial e validação cruzada, gerando classificações rígidas e probabilísticas. Os resultados indicaram elevado desempenho para a coleta (acurácia de 98,6% e índice Kappa de 0,966), enquanto o tratamento apresentou desempenho inferior (acurácia de 96,2% e Kappa de 0,870), refletindo maior complexidade espacial. As superfícies probabilísticas reforçaram a coerência do modelo e evidenciaram áreas com potencial de expansão. Os preditores mais influentes foram a proximidade da rede coletora e a vazão de esgoto não tratado, respectivamente para coleta e tratamento. Conclui-se que a SVM é uma ferramenta robusta para apoiar a universalização do saneamento, com potencial de aprimoramento por meio da comparação com outros algoritmos de aprendizado de máquina.

Introdução

A universalização dos sistemas de esgotamento sanitário permanece como um dos principais desafios do saneamento básico no Brasil, especialmente em áreas urbanas periféricas, onde persistem déficits históricos de infraestrutura e desigualdades no acesso aos serviços (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2024). Apesar dos avanços institucionais recentes, apenas parte do volume de esgoto gerado no país é coletada e tratada adequadamente, o que reforça a necessidade de ações estruturadas de planejamento e priorização de investimentos (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2024).

Com a promulgação do novo Marco Legal do Saneamento, foram estabelecidas metas de universalização da coleta e do tratamento de esgoto até 2033, impondo às concessionárias e ao poder público o desafio de acelerar a expansão dos sistemas e otimizar o uso de recursos financeiros e operacionais (BRASIL, 2020). Nesse contexto, o planejamento setorial passa a demandar ferramentas analíticas capazes de subsidiar decisões estratégicas e reduzir incertezas associadas à expansão da infraestrutura (ABRAHÃO, 2020).

A cobertura do sistema de esgotamento sanitário é influenciada por um conjunto de fatores físicos, socioeconômicos e operacionais, incluindo densidade demográfica, características topográficas, proximidade de redes existentes, presença de lançamentos de esgoto não tratado e custos de universalização (ABRAHÃO, 2020). Esses fatores interagem de forma complexa no território, tornando limitada a aplicação de métodos tradicionais de análise espacial quando utilizados de forma isolada (FOLHARINI; OLIVEIRA, 2020).

Diante desse cenário, o avanço das geotecnologias e da ciência de dados tem ampliado a aplicação de modelos matemáticos e técnicas de aprendizado de máquina em estudos ambientais e urbanos, permitindo a identificação de padrões espaciais e a simulação de cenários futuros (FOLHARINI; OLIVEIRA, 2020). Entre essas técnicas, destaca-se a máquina de vetores de suporte *(Support Vector Machine* – SVM), reconhecida por sua robustez na classificação de dados de alta dimensionalidade e na modelagem de relações não lineares (AMARAL, 2024).

Embora amplamente empregada em estudos ambientais e de uso e cobertura da terra, a aplicação da SVM no planejamento do esgotamento sanitário ainda é incipiente no Brasil, sobretudo em análises integradas de coleta e tratamento de esgoto (TONIOLO et al., 2024a). Assim, estudos de caráter aplicado tornam-se relevantes para demonstrar o potencial dessas ferramentas no apoio à tomada de decisão e na identificação de áreas prioritárias para a universalização dos serviços (TONIOLO et al., 2024b).

Diante desse contexto, o presente trabalho aplica a máquina de vetores de suporte na análise espacial da cobertura de coleta e tratamento de esgoto na Bacia Hidrográfica do Rio Cotia (SP), com ênfase em sua utilização como ferramenta de apoio ao planejamento da universalização do esgotamento sanitário.

Material e Métodos

A área de estudo corresponde à Bacia Hidrográfica do Rio Cotia (BHRC), localizada na porção oeste da Região Metropolitana de São Paulo, abrangendo os municípios de Cotia, Barueri, Carapicuíba, Embu das Artes, Jandira e Vargem Grande Paulista, com área aproximada de 251 km² (SABESP, 2024).

A BHRC é tradicionalmente subdividida em Alto Cotia (equivalente à Reserva Florestal do Morro Grande – RFMG) e Baixo Cotia, sendo este último caracterizado por intensa ocupação urbana, maior pressão antrópica e déficits históricos de esgotamento sanitário, o que resulta em lançamentos de efluentes não tratados e impactos na qualidade dos corpos hídricos (TONIOLO, 2020; SÃO PAULO, 2007). Em função dessas características e de sua relevância estratégica para o planejamento do saneamento, o presente estudo concentrou a análise no Baixo Cotia, sob responsabilidade operacional da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Sabesp (SABESP, 2024). A Figura 1 apresenta o mapa de localização da BHRC.

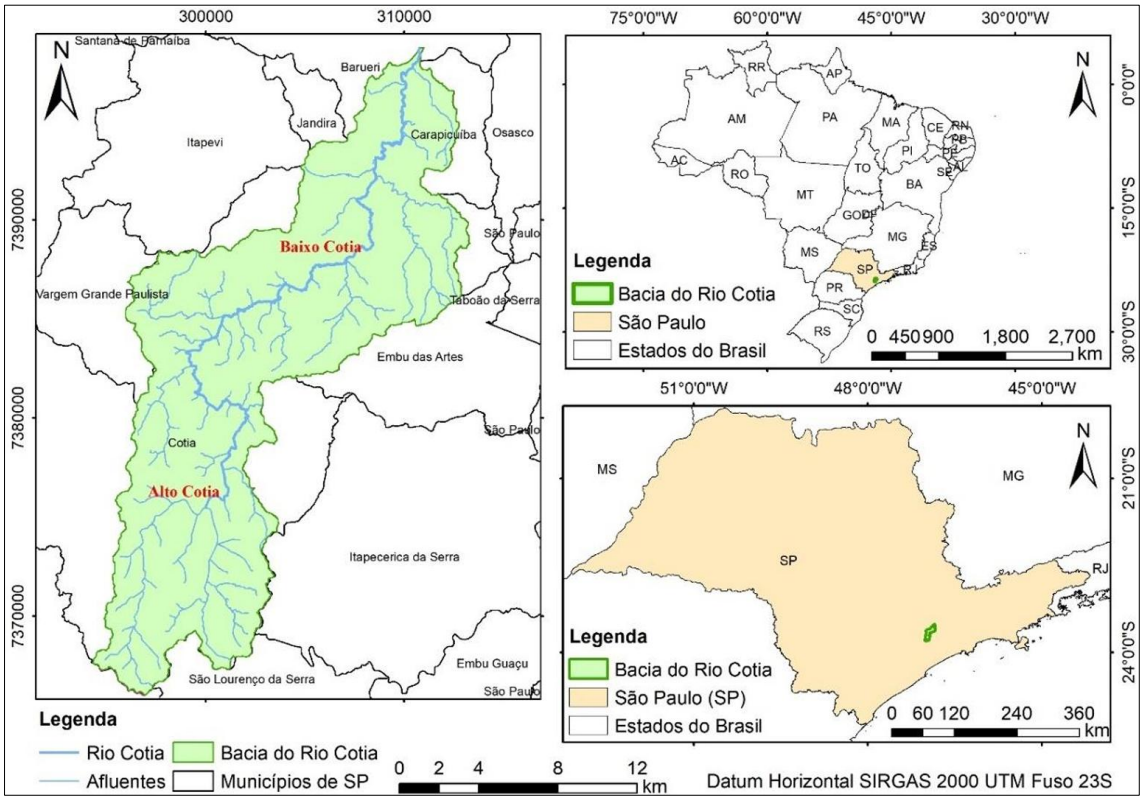


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.
Fonte: autoria própria.

O sistema de esgotamento sanitário da BHRC, em 2023, apresentava infraestrutura composta por aproximadamente 660 km de redes de esgoto em operação, integradas a estações elevatórias e unidades de tratamento distribuídas no território, com maior concentração no Baixo Cotia. No mesmo período, a bacia registrava 82.377 ligações de água e esgoto, 46.745 ligações somente de água e 278 ligações exclusivamente de esgoto, evidenciando uma cobertura heterogênea e ainda incompleta do serviço. Foram identificados 276 pontos de lançamento de efluentes não tratados, dos quais 179 permaneciam em operação, associados principalmente à ausência de rede coletora, ligações irregulares e limitações operacionais do sistema, configurando um cenário de desafios estruturais à universalização do esgotamento sanitário na região (SABESP, 2024).

Foram usados, no modelo espacial, dados geoespaciais matriciais e vetoriais disponibilizados pela Sabesp, complementados por bases cartográficas e socioeconômicas oficiais (SABESP, 2024; IBGE, 2024). As informações foram organizadas em ambiente de sistemas de informações geográficas, resultando na construção de 17 camadas rasterizadas, representativas de preditores físicos, socioeconômicos e operacionais que influenciam no comportamento do sistema de esgotamento sanitário (Quadro 1), conforme literatura especializada e consulta técnica a profissionais do setor (ABRAHÃO, 2020).

Nº	Variável	Unidade	Fonte
1	Consumo de água	m³/mês	Sabesp (2024)
2	Declividade do terreno	%	Hawker & Neal (2021)
3	Densidade demográfica	hab./km²	Sabesp (2024)
4	Proximidade de ocorrência de manutenção em rede	m	IBGE (2024) e Sabesp (2024)
5	Proximidade das unidades não cobertas	m	Sabesp (2024)
6	Proximidade das áreas de expansão	m	Sabesp (2024)
7	Proximidade de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)	m	Sabesp (2024)
8	Proximidade de Estação Elevatórias de Esgoto (EEE)	m	Sabesp (2024)
9	Proximidade de rede coletora	m	Sabesp (2024)
10	Proximidade de rede de distribuição de água potável	m	Sabesp (2024)

11	Proximidade dos empreendimentos imobiliários não cobertos	m	Sabesp (2024)
12	Proximidade de vias e núcleos urbanos	m	CEM (2020) e Toniolo (2020)
13	Proximidade de corpos hídricos	m	IGC (1979)
14	Transição do uso de ocupação da terra de 2002 para 2024	-	Adaptado de Toniolo (2020)
15	Custo de obras de esgoto para universalizar	R$	Sabesp (2024)
16	Vazão de esgoto não tratado	m³/mês	Sabesp (2024)
17	Proximidade de lançamento de efluente	m	Sabesp (2024)

Quadro 1: Variáveis usadas no modelo espacial.
Fonte: autoria própria.

As variáveis foram processadas no software TerrSet (CLARK LABS, 2024), de forma que as camadas foram padronizadas quanto à resolução espacial adotada de 30 metros, garantindo consistência para a etapa da modelagem (FOLHARINI & OLIVEIRA, 2020).

A modelagem espacial foi realizada por meio do algoritmo máquina de vetores de suporte (*Support Vector Machine* – SVM), adotado em função de sua robustez na classificação de dados de alta dimensionalidade e na representação de relações não lineares (CHANG; LIN, 2011). As assinaturas de treinamento foram elaboradas no módulo *MAKESIG*, a partir da identificação de áreas representativas das classes atendidas e não atendidas por coleta e tratamento de esgoto, com base na cobertura existente do sistema (SABESP, 2024).

O treinamento do modelo foi conduzido com kernel do tipo função de base radial (Radial Basis Function – RBF), sendo os parâmetros de penalidade (C) e gama (γ) calibrados por meio de busca em grade (grid search) e avaliados com validação cruzada do tipo k-fold, visando reduzir o risco de sobreajuste e maximizar a acurácia preditiva (AMARAL, 2024). A aplicação do modelo resultou em mapas de classificação rígida (hard classification) e superfícies probabilísticas (soft classification), representando a propensão espacial de cobertura do sistema de esgotamento sanitário (CLARK LABS, 2024).

A avaliação do desempenho do modelo foi realizada por meio da acurácia global, índice Kappa, matriz de confusão e análise do número de vetores de suporte, permitindo inferir o grau de complexidade das simulações (KUZERA; PONTIUS, 2008). Adicionalmente, a importância relativa dos preditores foi analisada pelo método *Backwards Stepwise Constant Forcing*, que mensura a sensibilidade do modelo à exclusão individual das variáveis, identificando os fatores mais influentes na configuração espacial da cobertura de coleta e tratamento de esgoto (CHANG; LIN, 2011).

Resultados

A Figura 2 apresenta uma representação conceitual do funcionamento do algoritmo de máquina de vetores de suporte, ilustrando sua lógica de separação entre classes em espaços de diferentes dimensionalidades. No plano bidimensional, observa-se a definição de uma fronteira de decisão linear, acompanhada por margens paralelas que delimitam a região de maior influência dos vetores de suporte. Esses vetores correspondem às amostras mais próximas da fronteira e exercem papel determinante na configuração final do classificador, evidenciando o princípio de maximização da margem adotado pelo SVM.

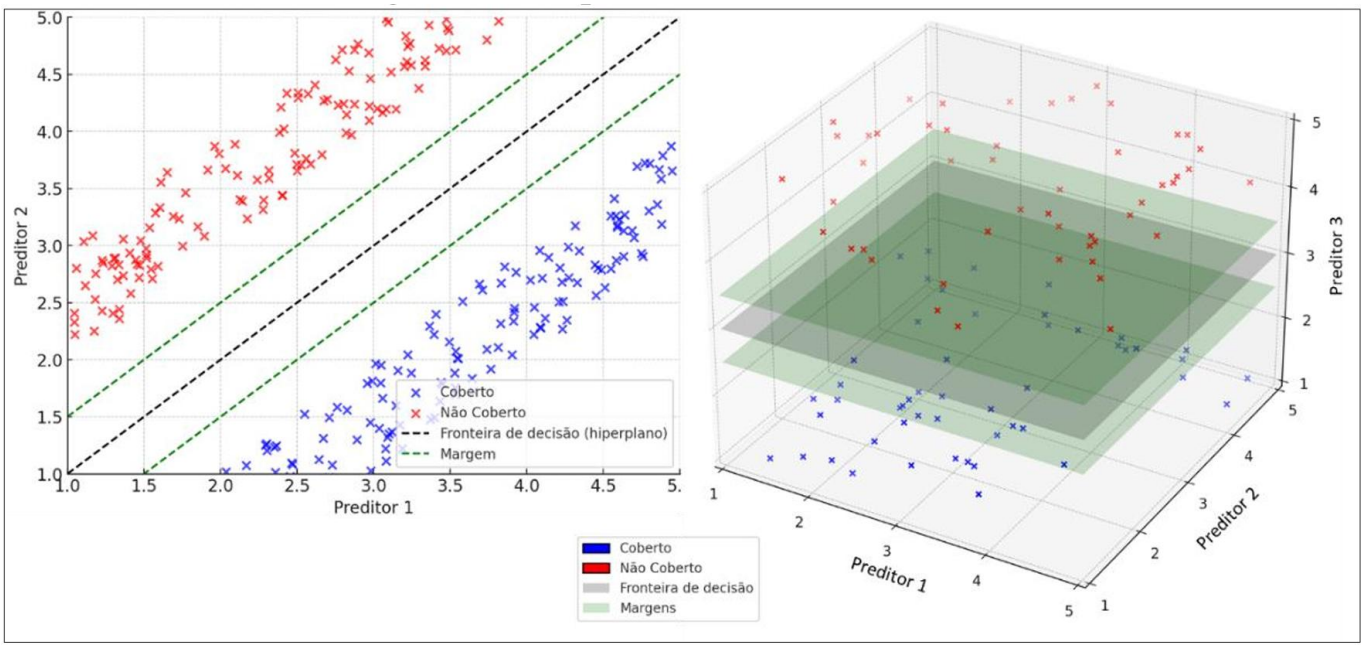


Figura 2: Esquema conceitual do modelo SVM.
Fonte: autoria própria.

Ainda analisando a Figura 2, verifica-se que, na representação tridimensional, a incorporação de um terceiro preditor amplia a visualização do processo classificatório, resultando na definição de um hiperplano em espaço 3D. Nessa configuração, a separação entre as classes passa a ocorrer em um domínio de maior complexidade, demonstrando a capacidade do algoritmo em lidar com múltiplas variáveis simultaneamente e modelar relações não lineares. Essa abordagem é particularmente adequada para sistemas de esgotamento sanitário, nos quais os padrões espaciais são condicionados por interações complexas entre fatores ambientais, urbanos e operacionais.

A Figura 3 apresenta a comparação entre a cobertura de coleta de esgoto simulada pelo modelo SVM e a cobertura existente no Baixo Cotia. De modo geral, verifica-se elevada correspondência espacial entre os dois cenários, indicando que o modelo foi capaz de reproduzir com precisão a distribuição territorial da rede coletora. As áreas centrais e mais densamente urbanizadas da bacia foram corretamente identificadas como atendidas, refletindo a forte influência da infraestrutura instalada e da ocupação urbana na configuração do sistema.

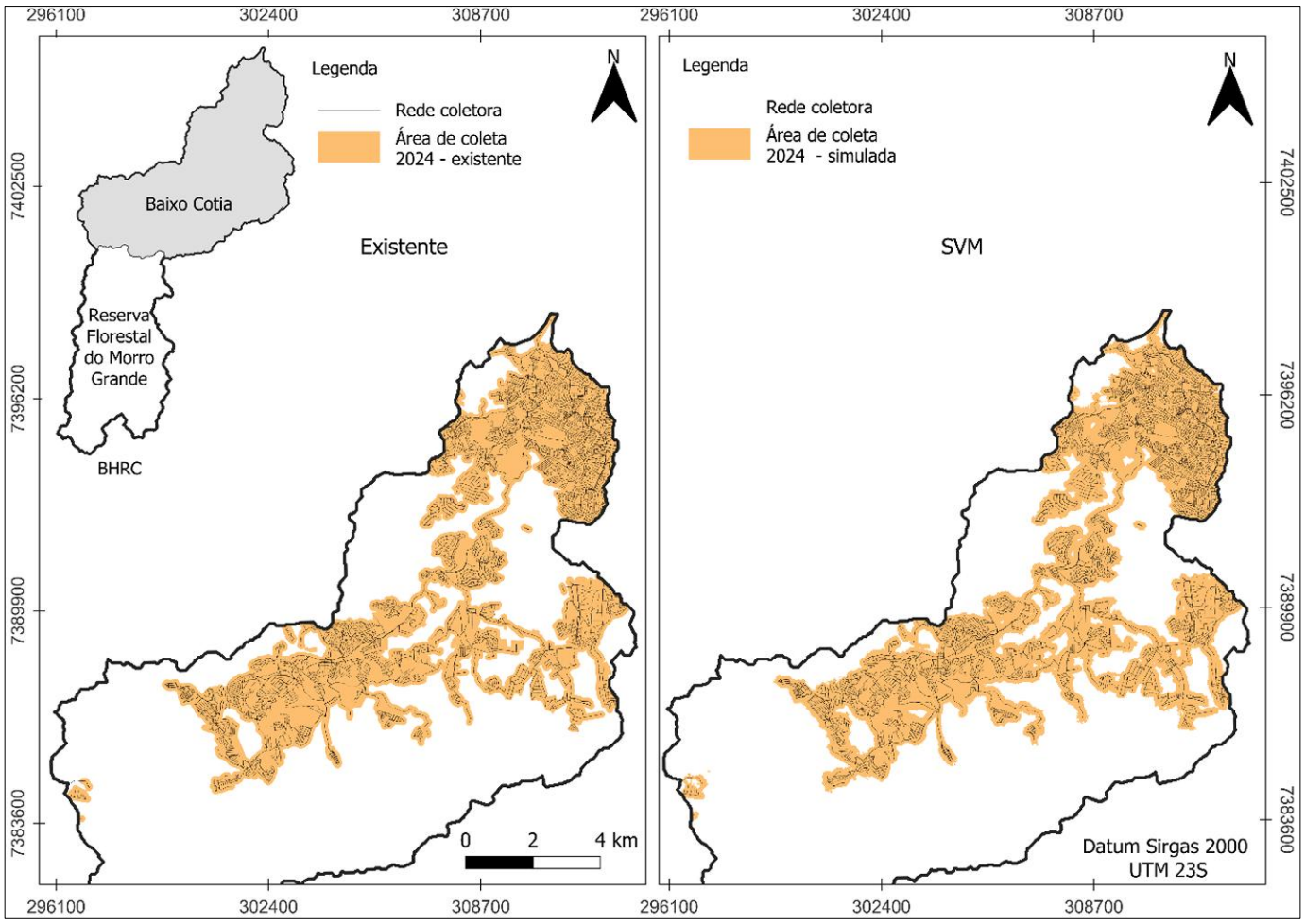


Figura 3: Mapa comparativo da cobertura simulada versus a cobertura existente para coleta de esgoto.
Fonte: autoria própria.

A Figura 3 aponta que diferenças pontuais entre a cobertura simulada e a existente concentram-se principalmente em áreas periféricas e em zonas de transição entre ambientes urbanos e menos consolidados. Nessas regiões, a classificação apresentou pequenas divergências, possivelmente associadas à heterogeneidade do tecido urbano, à fragmentação da rede e às limitações inerentes à base de dados utilizada no treinamento. Ainda assim, a coerência espacial observada reforça a capacidade preditiva do modelo para aplicações voltadas ao planejamento da expansão da coleta de esgoto.

A Figura 4 apresenta o resultado da simulação da cobertura de tratamento de esgoto em comparação com a situação existente. Assim como observado para a coleta, o modelo reproduziu de forma consistente os padrões gerais de atendimento por tratamento, com boa correspondência nas áreas onde a infraestrutura está consolidada. As regiões com maior concentração de interceptores e proximidade de estações de tratamento foram corretamente classificadas como atendidas.

Entretanto a simulação do tratamento revelou maior grau de discrepância em relação ao cenário real quando comparada à coleta. Em áreas periféricas, o modelo apresentou tendência à suavização da cobertura, extrapolando o atendimento para setores onde a infraestrutura de tratamento é inexistente ou limitada. Esse comportamento reflete a maior complexidade do sistema de tratamento, que depende de elementos centralizados e de condicionantes adicionais, como capacidade das ETEs e configuração topográfica, dificultando a delimitação precisa das áreas efetivamente atendidas.

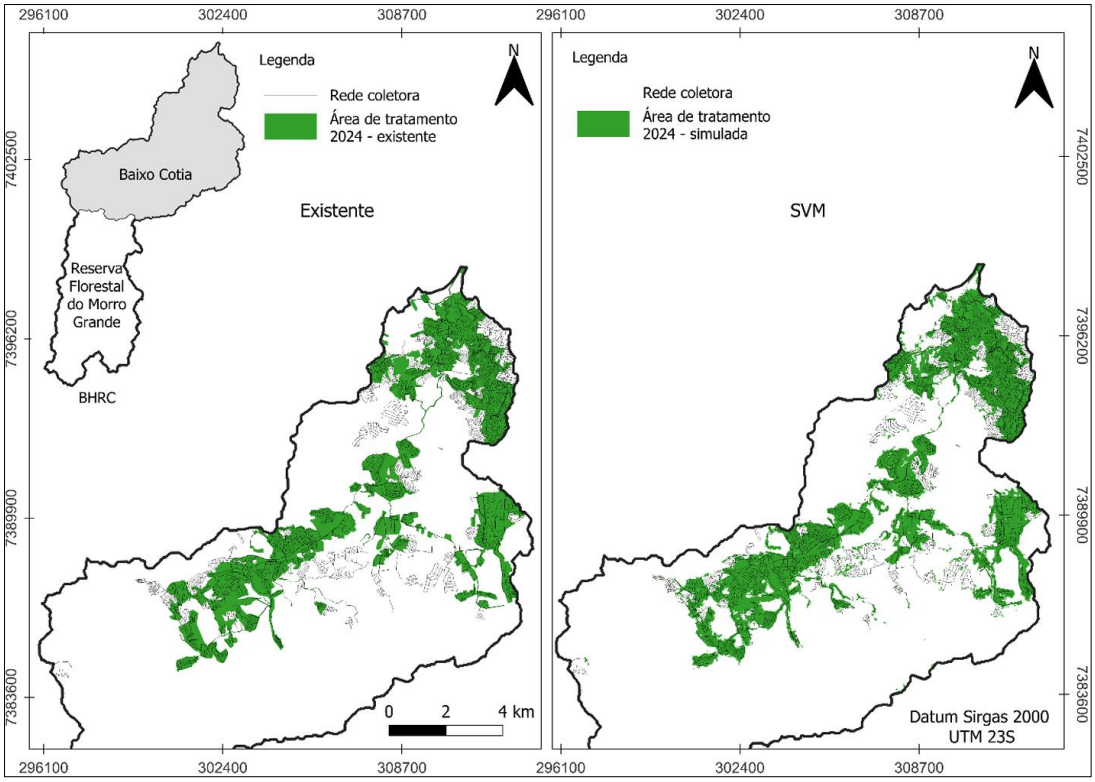


Figura 4: Mapa comparativo da cobertura simulada versus a cobertura existente para tratamento de esgoto.
Fonte: autoria própria.

A Figura 5 apresenta as superfícies de probabilidade de cobertura obtidas a partir da classificação probabilística do SVM para coleta e tratamento. Diferentemente da classificação rígida, que atribui cada unidade espacial a uma única classe, a abordagem probabilística expressa o grau de confiança do modelo quanto à condição de atendimento. Valores elevados indicam maior propensão à cobertura, enquanto valores baixos refletem baixa probabilidade de atendimento pelo sistema.

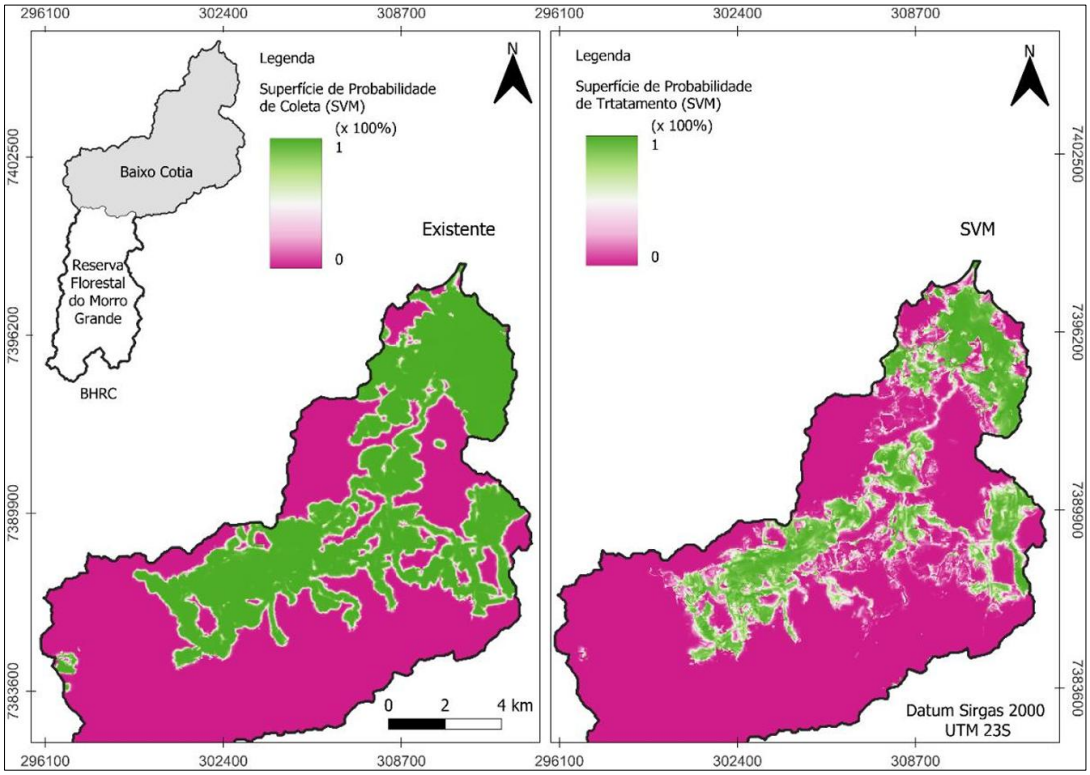


Figura 5: Mapa de superfície de probabilidade cobertura (coleta lado esquerdo e tratamento lado direito).
Fonte: autoria própria.

Observa-se na Figura 5 que a superfície probabilística da coleta apresenta extensas áreas com alta probabilidade de cobertura, especialmente nos setores urbanos consolidados, evidenciando a clareza dos padrões espaciais associados à rede coletora. Em contraste, a superfície referente ao tratamento apresenta transições mais graduais entre áreas atendidas e não atendidas, com maior dispersão dos valores de probabilidade, o que indica maior incerteza na definição das fronteiras de atendimento.

Ainda analisando a Figura 5, nota-se que essa diferença entre coleta e tratamento reforça a interpretação de que a coleta é espacialmente mais previsível, enquanto o tratamento envolve maior complexidade operacional e estrutural. As zonas de transição identificadas nas superfícies probabilísticas configuram áreas estratégicas para o planejamento da expansão do sistema, uma vez que representam setores com potencial de futura incorporação à cobertura existente.

Os parâmetros de desempenho do modelo SVM para coleta e tratamento estão sintetizados na Tabela 1. A simulação da coleta apresentou acurácia global de 98,6%, superior à obtida para o tratamento, que alcançou 96,2%. Essa diferença reflete a maior facilidade do modelo em generalizar padrões associados à rede coletora em comparação aos padrões de tratamento, que são mais dependentes de infraestrutura nodal e variáveis específicas.

Parâmetro	Coleta	Tratamento
Modo de parâmetros de treinamento	Pesquisa em grade	
Quantidade de classes	2	
Tipo de kernel	Função de base radial (*Radial Basis Function)*	
Parâmetro de penalidade C	8.192	2.048
Gama	1	20
Número total de vetores	732	1.631
Número de amostra pós amostragem	20.000	
Número total de amostras	28.162	
Medida geral de acurácia da validação cruzada	0,98682	0,9618
Tempo de treinamento (segundos)	112,85	214,00

Tabela 1: Desempenho do modelo SVM para coberta simulada de coleta e tratamento de esgoto.
Fonte: autoria própria.

Verificando- se a Tabela 1, nota-se que a análise dos parâmetros de calibração indica que o modelo de coleta utilizou valor mais elevado do parâmetro de penalidade C, resultando em uma fronteira de decisão mais rígida e maior precisão classificatória. No caso do tratamento, o valor de C foi menor, permitindo maior flexibilidade ao classificador, o que contribuiu para reduzir o risco de sobreajuste em um problema de maior complexidade. O parâmetro gama também apresentou diferenças significativas entre os dois modelos, evidenciando distintos níveis de sensibilidade às variações locais.

O número de vetores de suporte utilizados pelo modelo reforça essa interpretação, uma vez que a simulação do tratamento demandou mais que o dobro de vetores em relação à coleta. Esse resultado indica maior dificuldade de generalização e maior complexidade da fronteira de decisão para o tratamento, o que se reflete em maior tempo de treinamento e maior variabilidade dos resultados.

A Tabela 2 apresenta o desempenho do modelo desagregado por classe. Para a coleta, a classe Não Coleta apresentou acurácia superior à classe Coleta, indicando que a ausência de rede coletora constitui um padrão espacial mais homogêneo e facilmente reconhecido pelo algoritmo. Já a classe Coleta mostrou maior heterogeneidade, exigindo maior esforço do modelo para capturar seus padrões espaciais.

Parâmetro	Classe			
	Coleta	Não Coleta	Trata	Não Trata
Número total de vetor	375	357	785	846
Número de amostra pós amostragem	4.645	15.355	2.623	17.377
Número de amostra	65.394	216.218	36.931	24.468
Razão de complexidade (*Complexity Ratio*)	0,0057	0,0017	0,0213	0,0035
Acurácia	0,9722	0,9905	0,8631	0,9768

Tabela 2: Desempenho do modelo SVM para coberta simulada de coleta e tratamento de esgoto por classe.
Fonte: autoria própria.

No caso do tratamento (Tabela 2), a diferença entre as classes foi ainda mais acentuada. A classe Não Trata apresentou elevado desempenho, enquanto a classe Trata registrou acurácia significativamente inferior, confirmando a maior dificuldade do modelo em identificar áreas efetivamente atendidas por tratamento. O elevado valor da razão de complexidade associado à classe Trata evidencia a presença de uma fronteira de decisão altamente irregular e sujeita a incertezas.

A análise de sensibilidade dos preditores, apresentada na Tabela 2, evidencia diferenças marcantes entre os fatores que condicionam a coleta e o tratamento de esgoto. No modelo de coleta, a proximidade da rede coletora destacou-se como o preditor mais influente, seguida pela densidade demográfica e pela proximidade de unidades não atendidas, reforçando o papel da infraestrutura instalada e da concentração populacional na definição da cobertura.

Para o tratamento (Tabela 2), a vazão de esgoto não tratado emergiu como o principal fator explicativo, indicando que a magnitude dos lançamentos brutos exerce papel central na priorização da interceptação e do encaminhamento para tratamento. Outros preditores, como proximidade de rede coletora e unidades não atendidas, também apresentaram relevância, embora com menor influência relativa quando comparados ao modelo de coleta.

As matrizes de confusão e os índices Kappa, apresentados nas Tabelas 3 e 4, confirmam o desempenho superior da simulação da coleta em relação ao tratamento. O índice Kappa para a coleta indica concordância quase perfeita entre a cobertura simulada e a existente, com baixos erros de omissão e comissão. Para o tratamento, embora o desempenho também seja satisfatório, os erros foram mais elevados, especialmente na identificação das áreas atendidas, refletindo a maior complexidade do sistema.

Cobertura simulada	Coleta existente	Não coleta existente	Total	Erro de omissão
Coleta	63.640	1.621	65.261	0,0248
Não coleta	1.754	214.597	216.351	0,0081
Total	65.394	216.218	281.612	–
Erro de comissão	0,0268	0,0075	–	0,0119
Índice Kappa		0,9663 (96,63%)		

Tabela 3: Matriz de confusão e Índice Kappa para coleta de esgoto.
Fonte: autoria própria.

Cobertura simulada	Coleta existente	Não coleta existente	Total	Erro de omissão
Trata	32.782	4.182	36.964	0,01131
Não trata	4.149	240.499	24.468	0,0169
Total	36.931	244.681	281.612	-
Erro de comissão	0,1123	0,01761	–	0,295
Índice Kappa		0,8702 (87,02%)		

Tabela 4: Matriz de confusão e Índice Kappa para coleta de esgoto.
Fonte: autoria própria.

A Tabela 5 apresenta o ranking de influência das 17 variáveis, assim como a acurácia por validação cruzada, considerando o método de *Backwards Stepwise Constant Forcing*, isto é, Forçamento Constante Passo a Passo Regressivo.

Nº	Preditor	Acurácia CV – Coleta (%)	Ordem de influência – Coleta	Acurácia CV – Tratamento (%)	Ordem de influência – Tratamento
1	Consumo de água	98,62	13ª	96,25	11ª
2	Declividade do terreno	98,69	17ª	96,25	13ª
3	Densidade demográfica	98,42	2ª	96,11	5ª
4	Proximidade de manutenção em rede	98,50	4ª	96,07	4ª
5	Proximidade de unidades não cobertas	98,49	3ª	95,96	3ª
6	Proximidade de áreas de expansão	98,52	5ª	96,16	7ª
7	Proximidade de ETE	98,58	11ª	96,18	10ª
8	Proximidade de EEE	98,55	7ª	96,17	9ª
9	Proximidade de rede coletora	96,61	**1ª**	95,68	**2ª**
10	Proximidade de rede de distribuição de água potável	98,62	15ª	96,15	6ª
11	Proximidade de empreendimentos não cobertos	98,62	14ª	96,16	8ª
12	Proximidade de vias e núcleos urbanos	98,61	12ª	96,40	17ª
13	Proximidade de corpos hídricos	98,55	8ª	96,25	12ª
14	Transição do uso e ocupação do solo	98,66	16ª	96,38	16ª
15	Custo de obras de esgoto para universalizar	98,54	6ª	96,30	14ª
16	Vazão de esgoto não tratado	98,56	10ª	95,52	1ª
17	Proximidade de lançamento de efluentes	98,56	9ª	96,30	15ª

Tabela 5: Sensibilidade do modelo em forçar única variável independente como constante.
Fonte: autoria própria.

A avaliação de sensibilidade das variáveis (Tabela 5) evidencia comportamentos distintos entre os modelos de coleta e de tratamento de esgoto. No caso da coleta, a variável proximidade da rede coletora apresentou a maior influência, sendo responsável pela maior redução da acurácia quando mantida constante, o que confirma que a existência da infraestrutura instalada é o principal fator explicativo da cobertura. Esse resultado indica que a lógica territorial da coleta é fortemente dependente da malha existente, refletindo a relação direta entre rede disponível e possibilidade de atendimento.

Ainda para a coleta (Tabela 5), observou-se que densidade demográfica e proximidade das unidades não cobertas também exerceram influência relevante, sugerindo que áreas com maior concentração populacional e maior déficit de cobertura são determinantes na configuração espacial do sistema. Por outro lado, variáveis como declividade do terreno e transição do uso e ocupação do solo apresentaram menor impacto no desempenho do modelo, indicando que fatores ambientais exercem papel secundário na explicação da cobertura de coleta quando comparados às variáveis estruturais e urbanas.

Para a cobertura de tratamento, o comportamento do modelo foi distinto, destacando-se a vazão de esgoto não tratado como o preditor de maior influência, o que evidencia que a magnitude dos lançamentos brutos é um critério central na priorização do atendimento por tratamento. A relevância de variáveis como proximidade da rede coletora e das unidades não cobertas permanece, porém de forma menos concentrada, indicando que o tratamento depende de um conjunto mais amplo de condicionantes. Esse padrão reforça a maior complexidade do sistema de tratamento, cuja configuração espacial é menos previsível e mais sensível à interação entre infraestrutura centralizada, carga gerada e critérios operacionais.

Considerações Finais

Os resultados obtidos demonstram que a aplicação da máquina de vetores de suporte foi capaz de representar com elevada precisão espacial a cobertura de coleta e tratamento de esgoto na BHRC, com desempenho superior para a coleta em relação ao tratamento, evidenciado pelos índices de acurácia e Kappa. A análise de sensibilidade confirmou que a proximidade da rede coletora e a vazão de esgoto não tratado são os principais preditores para a explicação dos padrões espaciais de cobertura, respectivamente para coleta e tratamento, reforçando a influência direta da infraestrutura existente e da carga gerada no planejamento do sistema.

As superfícies probabilísticas indicaram coerência espacial dos resultados e potencial para identificação de áreas prioritárias à expansão do sistema, evidenciando a aplicabilidade da modelagem como ferramenta de apoio à tomada de decisão no planejamento da universalização do esgotamento sanitário. Embora robusta, a modelagem do tratamento apresentou maior complexidade, indicando a necessidade de investigações futuras com outros algoritmos de aprendizado de máquina, a fim de ampliar a capacidade explicativa e comparativa das simulações aplicadas ao saneamento básico.

Referências Bibliográficas

ABRAHÃO, N. C. Aplicações GIS para empresas de saneamento básico. São Paulo: ABES, 2020.

AMARAL, F. Mapeamento da suscetibilidade à inundação usando os modelos Floresta Aleatória e Máquina de Vetores de Suporte com diferentes tipos de kernel. Revista do Departamento de Geografia, v. 44, e213348, 2024.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020.

CEM – CENTRO DE ESTUDOS DA METRÓPOLE. Base cartográfica digital georreferenciada de logradouros da Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo, 2020.

CHANG, C. C.; LIN, C. J. LIBSVM: a library for support vector machines. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, v. 2, n. 3, p. 27, 2011.

CLARK LABS. TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling Software. 2024. Disponível em: <https://clarklabs.org/terrset/>. Acesso em: 02 fev. 2026.

FOLHARINI, S.; OLIVEIRA, R. Utilização do Land Change Modeler na modelação prospetiva do uso e cobertura do solo. Revista de Geografia e Ordenamento do Território, n. 19, p. 57–73, 2020.

HAWKER, L.; NEAL, J. FABDEM v1-2: global DEM. University of Bristol, 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2022: agregados por setores censitários. Rio de Janeiro, 2024.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Avanços do novo marco legal do saneamento básico no Brasil – 2024 (SNIS 2022). São Paulo, 2024.

KUZERA, K.; PONTIUS, R. G. Importance of ontology for multiple-resolution categorical map comparison. Annals of the Association of American Geographers, 2008.

SABESP – COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Relatórios gerenciais e bases geoespaciais do planejamento de expansão. São Paulo, 2024.

SÃO PAULO (Estado). Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Bacia do Rio Cotia: caracterização regional. São Paulo: IPT/Drenatec, 2007.

TONIOLO, B. P. Metodologia de avaliação de degradação ambiental utilizando técnicas de geoprocessamento na Bacia do Rio Cotia – SP. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2020.

TONIOLO, B. P.; SILVA, D. C. C.; LOURENÇO, R. W. Predição de uso e ocupação do solo em bacia hidrográfica com redes neurais artificiais. In: Integração de Saberes Ambientais. Anais eletrônicos, 2024a.

TONIOLO, B. P.; SILVA, D. C. C.; LOURENÇO, R. W. Evolução da área de cobertura de esgotamento sanitário da Bacia do Rio Cotia – SP. In: Workshop Internacional Sustentare & Wipis. Anais eletrônicos, 2024b.

SUSCETIBILIDADE AOS EVENTOS DE CHEIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ACRE – ACRE, BRASIL

1 Andressa Nunes Callado, 2 Fernando Silva de Carvalho, 3 Idvando Caetano de Moura, 4 Jonas Victor Santos Silva, 5 Romildo Lourenço dos Santos, 6 Manoel Mariano Neto

1 Universidade Federal de Alagoas - UFAL, e-mail: andressa.callado@ctec.ufal.br; 2 Universidade Federal de Alagoas - UFAL, e-mail: fernando.carvalho@arapiraca.ufal.br, 3 Universidade Federal de Alagoas - UFAL, e-mail:idvando.moura@ctec.ufal.br, 4 Universidade Federal de Alagoas - UFAL, e-mail: jonas.silva@ctec.ufal.br, 5 Universidade Federal de Alagoas - UFAL, e-mail: romildo.santos@proinfra.ufal.br, 6 Universidade Federal de Alagoas - UFAL, e-mail: manoel.mariano@ctec.ufal.br

Palavras-chave: suscetibilidade a inundações; geoprocessamento; bacia hidrográfica.

Resumo

As inundações representam um dos desastres naturais mais recorrentes e impactantes em escala global, causando prejuízos sociais, econômicos e ambientais significativos. Nesse contexto, a identificação de áreas suscetíveis à ocorrência de cheias constitui uma ferramenta importante para o planejamento territorial e a gestão de riscos hidrológicos. O presente estudo teve como objetivo analisar a suscetibilidade à ocorrência de cheias na bacia hidrográfica do rio Acre, localizada na região Norte do Brasil. A metodologia adotada baseou-se na integração de variáveis ambientais em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), considerando declividade média do terreno, uso e cobertura do solo, pedologia, precipitação média anual, distância em relação aos corpos hídricos e hipsometria. As variáveis foram normalizadas e integradas por meio da média aritmética simples, resultando na construção do índice de suscetibilidade à ocorrência de cheias. Os resultados evidenciaram predominância da classe média de suscetibilidade, ocupando aproximadamente 81,72% da área total da bacia, enquanto as classes baixa e muito baixa representam cerca de 18,26% da área analisada. As áreas com maior suscetibilidade concentram-se principalmente nas regiões próximas aos cursos d'água e em setores de menor altitude, onde a convergência do escoamento superficial favorece o acúmulo de água na paisagem. Os resultados obtidos contribuem para a compreensão da dinâmica hidrológica da bacia do rio Acre e fornecem subsídios relevantes para o planejamento territorial, a gestão de recursos hídricos e a mitigação de impactos associados a eventos de inundação.

Introdução

As inundações representam um dos desastres naturais mais recorrentes e impactantes em escala global, causando prejuízos sociais, econômicos e ambientais significativos. Esses eventos ocorrem quando o volume de água excede a capacidade de drenagem natural dos sistemas fluviais, resultando no transbordamento de rios e na inundação de áreas adjacentes, especialmente planícies aluviais. Em escala global, estimativas baseadas em séries temporais de imagens de satélite indicam que aproximadamente 2,23 milhões de km² de área terrestre são afetados por inundações, impactando diretamente entre 255 e 290 milhões de pessoas em todo o mundo (Tellman et al., 2021).

A ocorrência de eventos de inundação é condicionada por múltiplos fatores hidrológicos, geomorfológicos e climáticos. Alterações no uso e cobertura do solo, processos de urbanização e aumento da impermeabilização superficial podem intensificar o escoamento superficial, favorecendo a ocorrência de cheias em bacias hidrográficas. Nesse contexto, mudanças no sistema climático também desempenham papel importante na dinâmica hidrológica global, uma vez que modificações nos padrões de precipitação podem influenciar a frequência e a intensidade de eventos extremos de cheia em diversas regiões do planeta (Hirabayashi et al., 2013; Snikitha et al., 2024).

No Brasil, as inundações estão entre os desastres naturais mais frequentemente registrados, estando associadas tanto ao regime pluviométrico quanto às características hidrológicas das bacias hidrográficas. Eventos de cheia têm sido observados em diferentes regiões do país, provocando impactos significativos em áreas urbanas situadas próximas a cursos d'água. Mantovani et al. (2024) destaca que esses eventos podem resultar em perdas socioeconômicas relevantes, especialmente em regiões onde a expansão urbana ocorre sobre áreas suscetíveis à inundação.

Na região Norte do Brasil, a dinâmica hidrológica dos grandes rios amazônicos exerce forte influência sobre a ocorrência de eventos de cheia. A Amazônia apresenta elevada variabilidade hidrológica associada a fatores climáticos e ambientais, sendo caracterizada por períodos alternados de secas e cheias intensas. Estudos realizados na bacia do rio Acre indicam que eventos extremos registrados nas últimas décadas evidenciam a sensibilidade da região a variações climáticas que afetam diretamente o comportamento hidrológico das bacias amazônicas (Sena et al., 2012).

No estado do Acre, eventos de inundação associados à elevação do nível do rio Acre têm sido registrados de forma recorrente ao longo das últimas décadas. Esses eventos têm provocado impactos significativos sobre áreas urbanas localizadas em planícies fluviais, especialmente no município de Rio Branco, onde parte da população encontra-se estabelecida em áreas suscetíveis à inundação. Registros de eventos extremos e relatórios de monitoramento hidrológico indicam que episódios de cheia têm ocorrido com frequência na região, resultando em situações de emergência e deslocamento de populações ribeirinhas (Silva et al., 2023).

Apesar da recorrência de eventos de inundação na bacia do rio Acre, ainda são limitados os estudos voltados à análise integrada de variáveis biofísicas capazes de identificar áreas potencialmente suscetíveis a eventos de cheia na região. Nesse sentido, análises de suscetibilidade a inundações constituem ferramentas importantes para a identificação de áreas vulneráveis e para o suporte ao planejamento territorial e à gestão de riscos hidrológicos (Waghwala e Agnihotri, 2019).
Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar a suscetibilidade aos eventos de cheia na bacia hidrográfica do rio Acre, por meio da integração de variáveis ambientais relacionadas ao relevo, ao uso e cobertura do solo, às características do solo, à precipitação e à proximidade de cursos d'água.

Área de Estudo

A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do rio Acre, localizada na região Norte do Brasil e inserida no sistema hidrográfico da bacia do rio Purus, um dos principais afluentes da margem direita do rio Amazonas. Essa bacia possui grande relevância hidrológica para o estado do Acre, uma vez que o rio Acre constitui um dos principais cursos d'água da região, atravessando municípios como Assis Brasil, Brasiléia, Xapuri e Rio Branco, capital do estado (Sena, 2012).

A dinâmica hidrológica da bacia é marcada por variações significativas nos níveis d'água ao longo do ano, associadas principalmente ao regime pluviométrico da região amazônica, o que contribui para a ocorrência recorrente de eventos de cheia, especialmente em áreas urbanas situadas próximas ao canal principal do rio (Santos, 2020).

A delimitação espacial da bacia hidrográfica do rio Acre é apresentada na Figura 1, que ilustra sua localização na região amazônica e sua inserção territorial em relação às fronteiras internacionais do Brasil com o Peru e a Bolívia. O mapa também apresenta a rede hidrográfica principal e a variação altimétrica da bacia, representada por meio do modelo hipsométrico.

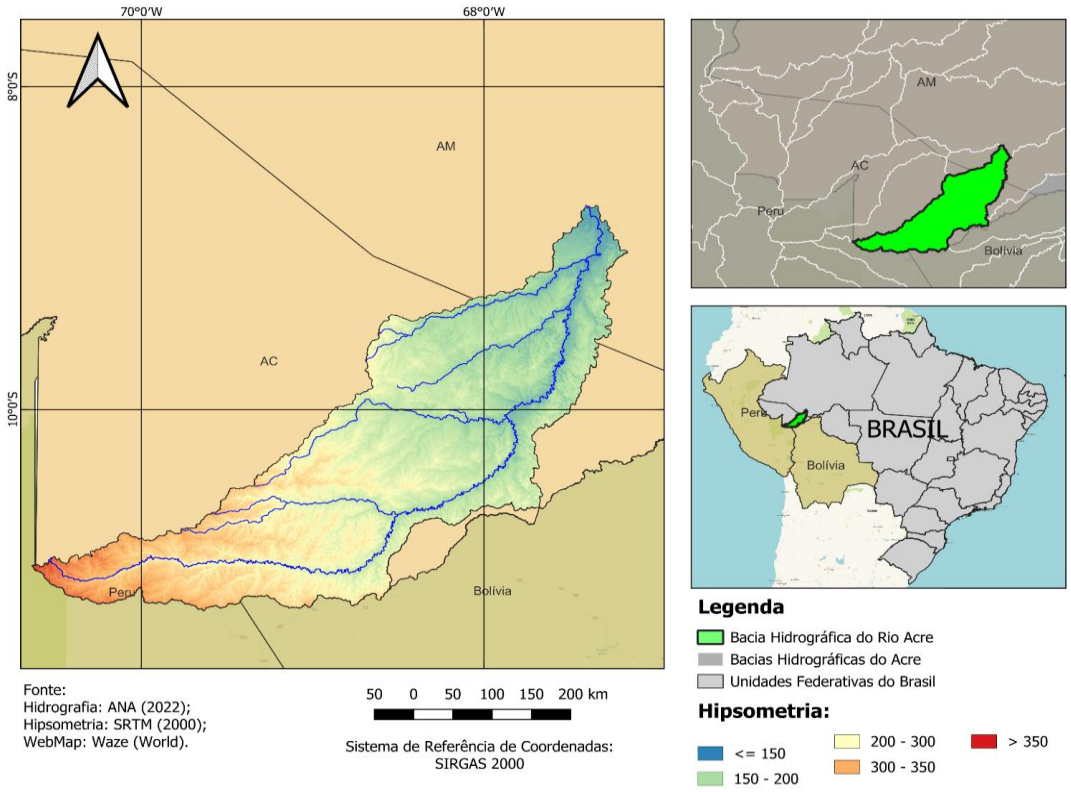


Figura 1: Localização da bacia hidrográfica do rio Acre.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A análise espacial da bacia hidrográfica constitui uma etapa essencial para a compreensão da distribuição dos fatores físicos que influenciam a dinâmica hidrológica e a ocorrência de eventos de inundação em sistemas fluviais (Biancamaria et al., 2015).

Metodologia

A avaliação da suscetibilidade biofísica à ocorrência de cheias na bacia hidrográfica do rio Acre foi realizada por meio da integração de variáveis ambientais em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG). A seleção das variáveis considerou fatores biofísicos capazes de influenciar diretamente os processos hidrológicos relacionados ao escoamento superficial, à infiltração da água no solo e à concentração de fluxos hídricos na paisagem. A utilização de técnicas de geoprocessamento possibilita a integração e análise espacial de diferentes variáveis ambientais, contribuindo para a compreensão de processos naturais e para o planejamento territorial (Ladwig; Sutil; De Conto, 2022).

Foram utilizadas seis variáveis ambientais consideradas relevantes para a análise da suscetibilidade a cheias: uso e cobertura do solo, declividade média do terreno, pedologia, precipitação média anual, distância em relação aos corpos hídricos e hipsometria. Essas variáveis representam fatores naturais que condicionam a dinâmica hidrológica das bacias hidrográficas, influenciando a geração de escoamento superficial, a capacidade de infiltração do solo e a concentração de fluxos de água ao longo da rede de drenagem.

Os dados referentes ao uso e cobertura do solo foram obtidos a partir da plataforma MapBiomas, considerando o ano de 2022, disponibilizada pela plataforma do Projeto MapBiomas, que utiliza classificação automática de séries temporais de imagens de satélite. As variáveis declividade média do terreno e hipsometria foram derivadas do Modelo Digital de Elevação SRTM com resolução espacial de 30 metros. As informações pedológicas foram obtidas a partir da base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) do ano de 2025, enquanto a rede hidrográfica utilizada para o cálculo da distância dos corpos hídricos foi obtida a partir da base de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), considerando o ano de 2022. A variável precipitação média anual foi estimada a partir da normal climatológica do período de 1981 a 2024, obtida por meio da base de dados CHIRPS, frequentemente utilizada em estudos hidrológicos em regiões com baixa densidade de estações meteorológicas.

O processamento das variáveis foi realizado em ambiente de Sistema de Informações Geográficas utilizando o software QGIS. Inicialmente foram realizadas etapas de organização e padronização das bases de dados espaciais, incluindo reprojeção das camadas para o mesmo sistema de referência espacial, recorte das informações para os limites da bacia hidrográfica e geração das variáveis derivadas. Em seguida, as camadas temáticas foram reclassificadas e preparadas para a etapa de normalização dos indicadores.

A normalização das variáveis foi realizada com o objetivo de padronizar os diferentes parâmetros analisados em uma escala comum de análise, possibilitando a integração de variáveis originalmente expressas em diferentes unidades de medida. Para a variável de precipitação média (PM) foi aplicada a Equação (01), apresentada a seguir:

$$I_{max} = \frac{(Indicador - V_{min})}{(V_{máx} - V_{min})} \quad (01)$$

em que $I_{máx}$ corresponde ao valor normalizado do indicador, $V_{máx}$ representa o valor máximo observado para a variável e V_{min} corresponde ao valor mínimo observado.

Quando a variável apresenta relação inversamente proporcional à suscetibilidade a inundações, como é o caso da declividade média (DM), distância dos corpos hídricos (DH) e hipsometria (HP), foi aplicada a Equação (02).

$$I_{min} = 1 - \frac{(Indicador - V_{min})}{(V_{máx} - V_{min})} \quad (02)$$

em que I_{min} corresponde ao valor normalizado para indicadores inversos, considerando novamente os valores máximos e mínimos da variável analisada.

Por fim, para as variáveis pedologia (PD) e uso e ocupação do solo (US), a normalização foi realizada por meio da reclassificação das classes temáticas. Após o processo de normalização e reclassificação das variáveis, as mesmas foram integradas para a construção do Índice de Suscetibilidade à ocorrência de cheias. O índice foi obtido por meio da média aritmética simples das variáveis padronizadas, conforme apresentado na Equação (03).

$$IsBio = \frac{US + DM + PD + DH + HP + PM}{6} \quad (03)$$

em que US corresponde ao uso e cobertura do solo, DM representa a declividade média do terreno, PD corresponde às características pedológicas, DH representa a distância em relação aos corpos hídricos, HP corresponde à hipsometria e PM representa a precipitação média anual.

A média aritmética simples foi adotada como método de integração das variáveis por permitir a combinação equilibrada dos indicadores normalizados, evitando a atribuição de pesos subjetivos ao modelo de suscetibilidade. Os valores obtidos para o índice variam entre 0 e 1, sendo que valores mais próximos de 1 indicam maior suscetibilidade biofísica à ocorrência de cheias na bacia hidrográfica do rio Acre. A aplicação desse procedimento permitiu representar espacialmente a suscetibilidade biofísica na bacia hidrográfica, evidenciando as áreas com maior potencial de ocorrência de eventos de inundação.

Resultados e Discussão

A análise espacial das variáveis permitiu identificar os principais condicionantes ambientais associados à suscetibilidade à ocorrência de cheias na bacia hidrográfica do rio Acre.

As Figuras 2 e 3 apresentam as variáveis utilizadas no modelo de suscetibilidade, compreendendo declividade média do terreno, uso e cobertura do solo, pedologia, normal climatológica, distância dos rios principais e hipsometria da bacia. Essas variáveis influenciam diretamente a geração do escoamento superficial, a capacidade de infiltração do solo, a concentração dos fluxos hídricos e a permanência da água nas áreas mais baixas da bacia.

A análise do uso e cobertura do solo evidencia predominância da classe floresta ao longo da bacia hidrográfica, representando aproximadamente 65,55% da área total analisada, enquanto áreas destinadas à agropecuária correspondem a cerca

de 33,48% da área da bacia. As demais classes apresentam participação espacial reduzida. A predominância da cobertura florestal exerce influência significativa na dinâmica hidrológica da bacia, uma vez que áreas com vegetação natural favorecem processos de interceptação da precipitação, infiltração da água no solo e redução do escoamento superficial. Alterações no uso e cobertura da terra podem modificar a resposta hidrológica das bacias hidrográficas, aumentando a geração de escoamento superficial e contribuindo para a intensificação de eventos de inundação (Snikitha et al., 2024).

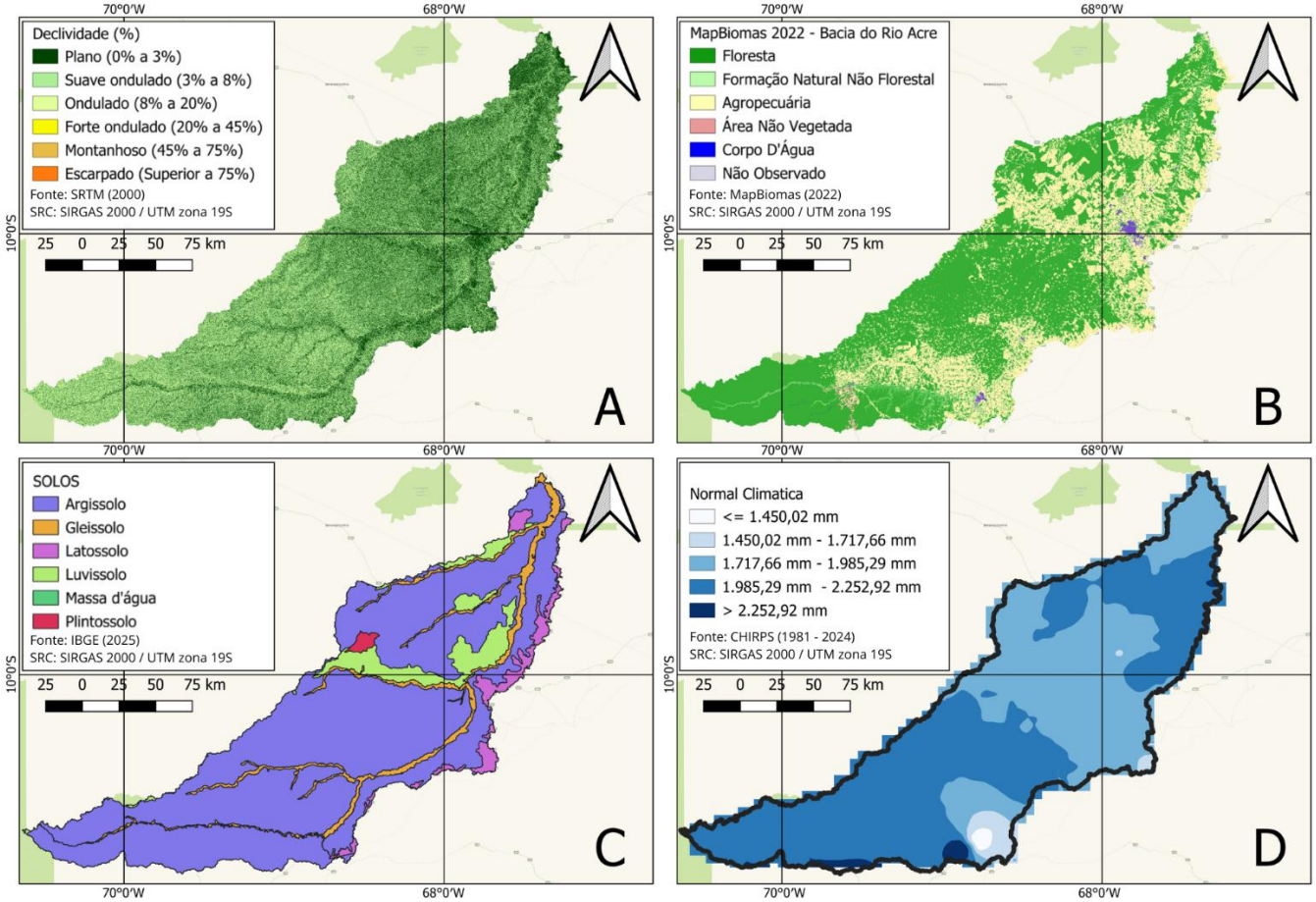


Figura 2: Variáveis: a) Declividade média do solo, b) Uso e Cobertura do solo, c) Pedologia, d) Normal climatológica
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

No que se refere à declividade do terreno, observa-se predominância de áreas com baixos gradientes topográficos ao longo da bacia, caracterizando relevo predominantemente plano a suavemente ondulado. Essa condição geomorfológica favorece a redução da velocidade do escoamento superficial e contribui para o acúmulo de água em determinadas porções da paisagem, principalmente em áreas próximas à rede hidrográfica.

A análise da pedologia indica predominância de argissolos na área de estudo, seguidos pela presença de gleissolos. Os argissolos apresentam variações na permeabilidade relacionadas ao acúmulo de argila em subsuperfície, enquanto os gleissolos estão frequentemente associados a ambientes hidromórficos, com maior saturação hídrica e drenagem natural limitada. Essas características pedológicas influenciam diretamente a dinâmica de infiltração e armazenamento de água no solo.

A análise da normal climatológica evidencia valores elevados de precipitação média anual na bacia hidrográfica do rio Acre, com média aproximada de 2003 mm no período analisado, refletindo o regime climático úmido característico da região amazônica (Hirabayashi et al., 2013).

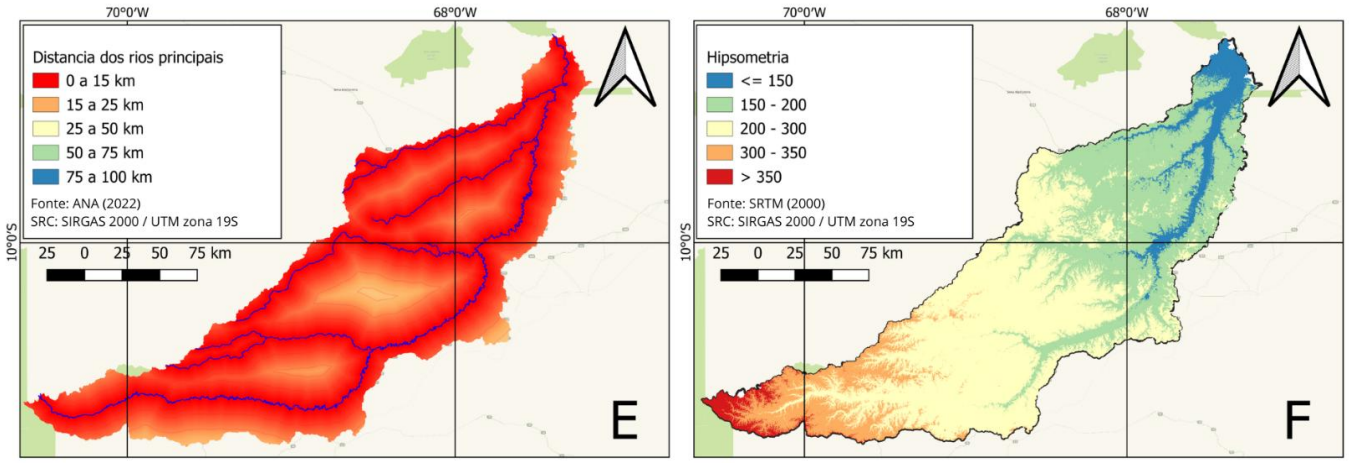


Figura 3: Variáveis: e) Distância dos rios principais, f) Hipsometria da bacia do rio Acre.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A variável distância dos rios principais evidencia que uma parcela significativa da bacia encontra-se próxima à rede hidrográfica. Aproximadamente 37% da área situa-se a menos de 5 km dos principais cursos d'água, enquanto cerca de 26% encontram-se entre 5 e 10 km de distância. A proximidade com a rede hidrográfica constitui um dos principais fatores associados à ocorrência de inundações, uma vez que áreas adjacentes aos canais fluviais apresentam maior probabilidade de transbordamento durante períodos de elevação do nível dos rios (Tellman et al., 2021).

A análise hipsométrica indica predominância de áreas em cotas altimétricas mais baixas, associadas principalmente às porções próximas aos canais fluviais, o que favorece a concentração do escoamento superficial e o acúmulo de água na paisagem.

A análise conjunta das variáveis apresentadas nas Figuras 2 e 3 possibilitou identificar padrões espaciais relacionados à maior ou menor predisposição do território à ocorrência de eventos de cheia, cuja distribuição espacial do índice resultante é apresentada na Figura 4.

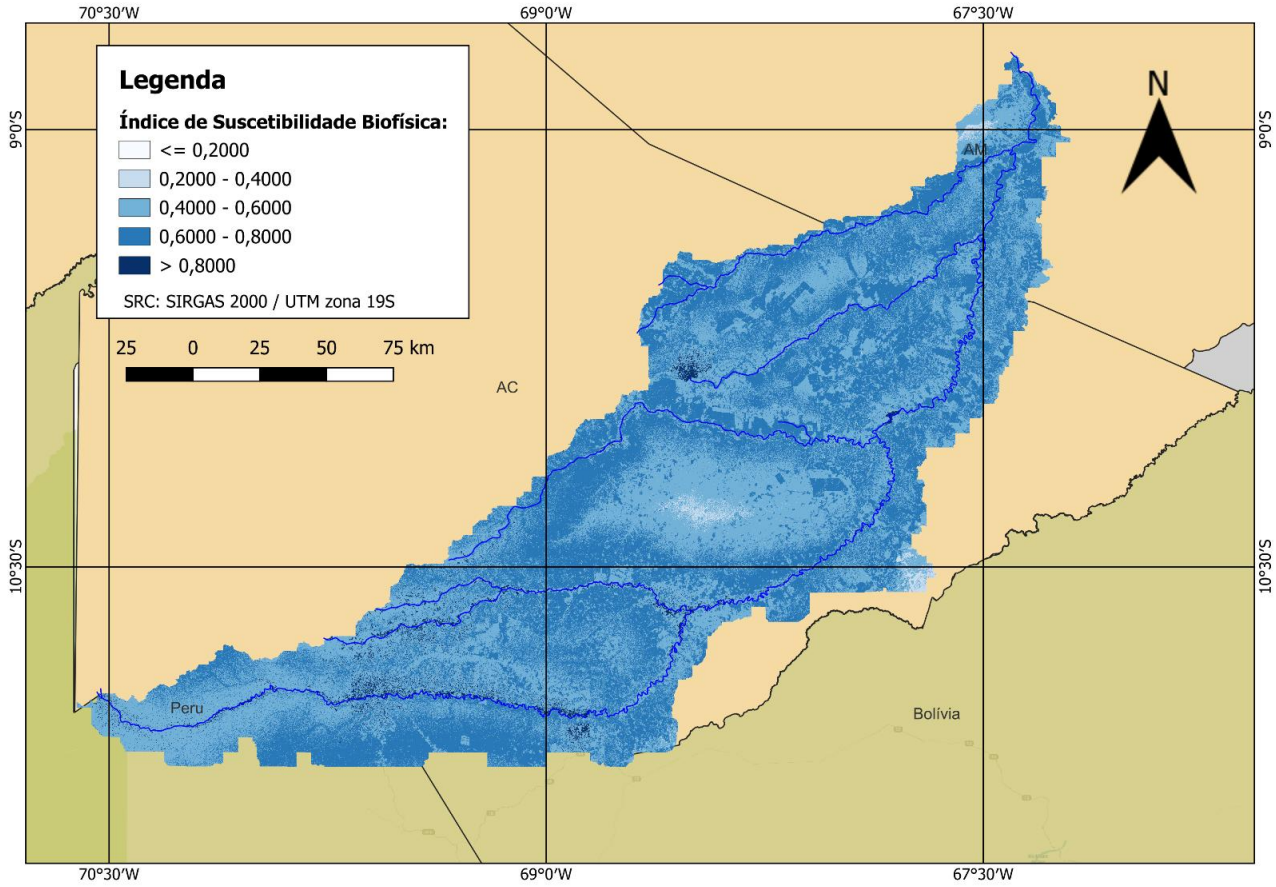


Figura 4: Índice de suscetibilidade à cheia da bacia do rio Acre.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A classificação do índice evidencia predominância da classe média de suscetibilidade, que ocupa aproximadamente 26.786,42 km², correspondendo a cerca de 81,72% da área total da bacia. A classe de suscetibilidade baixa representa cerca de 17,84% da área analisada, enquanto as classes muito baixa, alta e muito alta apresentam participação espacial reduzida.
A distribuição das classes do índice de suscetibilidade é apresentada na Tabela 01.

Classes	Área (km²)	Percentual
Muito Baixa	139,13	0,42%
Baixa	5.846,43	17,84%
Média	26.786,42	81,72%
Alta	2,266	0,01%
Muito Alta	5,257	0,02%
Área Total	**32.779,503**	**100,00%**

Tabela 01: Classificação do Índice de Suscetibilidade à ocorrência de cheias na bacia hidrográfica do rio Acre.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A predominância da classe média de suscetibilidade indica relativa homogeneidade das condições biofísicas ao longo da bacia hidrográfica do rio Acre. Esse padrão pode ser explicado pela combinação entre elevada precipitação anual, relevo predominantemente plano, ampla cobertura florestal e forte influência da rede hidrográfica. Em bacias inseridas no contexto amazônico, essas características ambientais tendem a produzir respostas hidrológicas semelhantes em grandes porções do território, resultando em padrões espaciais de suscetibilidade intermediária quando múltiplos fatores ambientais são integrados em modelos de análise espacial.

Embora as classes alta e muito alta apresentem baixa representatividade percentual, sua ocorrência espacial tende a concentrar-se em áreas próximas aos principais cursos d'água e em setores de menor altitude da bacia, onde a convergência do escoamento superficial favorece o acúmulo de água. Esses setores correspondem, em geral, a áreas associadas às planícies fluviais, que apresentam maior probabilidade de inundação durante eventos de elevação do nível dos rios.

Dessa forma, os resultados evidenciam que a suscetibilidade à ocorrência de cheias na bacia hidrográfica do rio Acre está associada à interação entre múltiplos fatores ambientais. A análise integrada dessas variáveis permite compreender a dinâmica hidrológica da bacia e identificar áreas potencialmente mais suscetíveis a eventos de inundação.

Considerações Finais

Este estudo teve como objetivo avaliar a suscetibilidade à ocorrência de cheias na bacia hidrográfica do rio Acre a partir da integração de variáveis ambientais em ambiente de Sistema de Informações Geográficas. A abordagem adotada permitiu analisar a interação entre fatores geomorfológicos, pedológicos, climáticos e de uso da terra que condicionam a dinâmica hidrológica da bacia, contribuindo para a compreensão dos processos naturais associados à ocorrência de inundações.

Os resultados evidenciaram predominância da classe média de suscetibilidade ao longo da maior parte da bacia hidrográfica do rio Acre, indicando relativa homogeneidade das condições biofísicas que influenciam a dinâmica hidrológica regional. Esse padrão está associado à combinação entre elevada precipitação média anual, relevo predominantemente plano a suavemente ondulado, presença significativa de cobertura florestal e forte influência da rede hidrográfica. As áreas classificadas com maior suscetibilidade concentram-se principalmente nas regiões próximas aos cursos d'água e em setores de menor altitude, onde a convergência do escoamento superficial favorece o acúmulo de água na paisagem e aumenta a probabilidade de ocorrência de inundações.

A aplicação do Índice de Suscetibilidade demonstrou que a integração de variáveis ambientais por meio de técnicas de geoprocessamento constitui uma ferramenta eficiente para a análise espacial de áreas suscetíveis a cheias. A espacialização dos fatores condicionantes permite compreender padrões ambientais associados à dinâmica hidrológica da bacia e identificar setores potencialmente mais vulneráveis a eventos de inundação.

Do ponto de vista aplicado, os resultados obtidos fornecem subsídios relevantes para o planejamento territorial e para a gestão de riscos associados a eventos hidrológicos extremos na bacia hidrográfica do rio Acre. A identificação de áreas com maior suscetibilidade à ocorrência de cheias pode contribuir para orientar ações de monitoramento, planejamento urbano, ocupação do solo e definição de estratégias de mitigação de impactos, especialmente em regiões onde a expansão das atividades humanas pode aumentar a exposição da população aos riscos hidrológicos.

Entretanto, é importante destacar que a análise realizada baseia-se exclusivamente em variáveis biofísicas, não considerando diretamente fatores socioeconômicos, infraestrutura urbana ou aspectos relacionados à vulnerabilidade da população. Dessa forma, estudos futuros podem ampliar a abordagem adotada neste trabalho por meio da integração de indicadores sociais, dados hidrológicos observados e modelagens hidrodinâmicas mais detalhadas, permitindo uma avaliação mais abrangente do risco de inundação na região.

A metodologia aplicada apresenta potencial para ser replicada em outras bacias hidrográficas da Amazônia, contribuindo para ampliar o conhecimento sobre a distribuição espacial da suscetibilidade a cheias e apoiar ações de gestão integrada dos recursos hídricos em regiões sujeitas a eventos hidrológicos extremos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Este trabalho contou ainda com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências Bibliográficas

BIANCAMARIA, S.; LETTENMAIER, D. P.; PAVELSKY, T. M. The SWOT mission and its capabilities for land hydrology. *Surveys in Geophysics*, v. 37, n. 2, p. 307–337, 2016. https://doi.org/10.1007/s10712-015-9346-y.

HIRABAYASHI, Y.; MAHENDRAN, R.; KOURTEGAS, G.; YAMAZAKI, D.; WATANABE, S.; KIM, H.; KANAE, S. Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, v. 3, p. 816–821, 2013.

LADWIG, N. I.; SUTIL, T.; DE CONTO, D. (org.). *Paisagem e território no geoprocessamento*. Caxias do Sul: EDUCS, 2022.
MANTOVANI, J.; ALCÂNTARA, E.; MARENGO, J. A.; LONDE, L.; PARK, E.; CUNHA, A. P.; TOMASELLA, J. Flood risk mapping during the extreme February 2021 flood in the Juruá River, Western Brazilian Amazonia, State of Acre. *Sustainability*, v. 16, p. 2999, 2024. https://doi.org/10.3390/su16072999.

RIO BRANCO. Prefeitura Municipal de Rio Branco. *Plano de contingência: inundação gradual*. Rio Branco, 2025.
SENA, J. A. N.; DEUS, L. A. B.; FREITAS, M. A. V.; COSTA, L. Extreme events of droughts and floods in Amazonia: 2005 and 2009. *Water Resources Management*, v. 26, n. 6, p. 1665–1676, 2012. https://doi.org/10.1007/s11269-012-0166-2.

SILVA, Sonaira Souza da; BROWN, Foster; SAMPAIO, Amanda de Oliveira; SILVA, Ana Luiza Costa; SANTOS, Nairiane Cherlins Rodrigues Souza dos; LIMA, Aroldo Carvalho; AQUINO, Antônio Marcos de Souza; SILVA, Paulo Henrique da Costa; MOREIRA, Jose Genivaldo do Vale; OLIVEIRA, Igor; COSTA, Alexandre Araújo; FEARNSIDE, Philip Martin. Amazon climate extremes: Increasing droughts and floods in Brazil's state of Acre. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 21, p. 311–317, 2023. https://doi.org/10.1016/j.pecon.2023.10.006.

TELLMAN, B.; SULLIVAN, J. A.; KUHN, C.; KETTNER, A. J.; DOYLE, C. S.; BRAKENRIDGE, G. R.; ERICKSON, T. A.; SLAYBACK, D. A. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. Nature, v. 596, p. 80–86, 2021. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w.

WAGHWALA, R. K.; AGNIHOTRI, P. G. Flood risk assessment using geospatial techniques for Surat City, India. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 40, p. 101155, 2019. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101155.

DINÂMICA DO USO E COBERTURA DO SOLO NO CENTRO URBANO SANTA MARIA (RS) ENTRE 2014 E 2024: ANÁLISE DE MÉTRICAS DE PAISAGEM E ÍNDICES DE DIVERSIDADE

1 Eduarda dos Santos Schossler, 2 Rutineia Tassi, 3 Fabiana Campos Pimentel, 4 Francisco Paim de Freitas Neto, 5 Rodrigo Xavier Cabeda, 6 Luize Baldoni de Oliveira, 7 Gabriel Gomes Muniz, 8 Valéria Dias Osorio

1Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: eduarda.schossler@acad.ufsm.br; 2Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: rutineia@gmail.com; 3Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: fabiana.pimentel@acad.ufsm.br; 4Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: francisco.freitas@acad.ufsm.br; 5Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: rodrigo.cabeda@acad.ufsm.br; 6Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: oliveira.luize@acad.ufsm.br; 7Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: ggar.424@gmail.com; 8Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: valeria.osorio174@gmail.com

Palavras-chave: LecoS; fragmentação de paisagem; Mapbiomas.

Resumo

O presente estudo teve como objetivo analisar a dinâmica do uso e cobertura do solo no centro urbano do município de Santa Maria (RS), no período de 2014 a 2024, com base em métricas de paisagem e índices de diversidade ecológica. Para isso, foram utilizados dados geoespaciais, derivados de imagens *Landsat* com resolução espacial de 30 metros, provenientes da plataforma MapBiomas. Para a avaliação da paisagem, foram calculados os índices de diversidade, *Shannon* e *Simpson*, este último que na forma 1 – D representa diversidade, bem como as métricas de *Patch Cohesion Index* (PCI), *Number of Patches* (NP) e *Patch Density* (PD), com o objetivo de analisar a fragmentação e a conectividade das classes consideradas. Os resultados evidenciaram a expansão do centro urbano e a redução e fragmentação das classes naturais, especialmente da Formação Campestre. Por sua vez, os índices de diversidade apresentaram pequenas variações ao longo do período analisado, sugerindo relativa estabilidade na heterogeneidade da paisagem. Esses resultados demonstram que, embora tenha ocorrido crescimento urbano, a diversidade geral da paisagem foi mantida, mas com aumento da fragmentação e reorganização espacial dos usos do solo. Dessa forma, o uso integrado de geotecnologias e métricas de paisagem mostrou-se eficiente para o monitoramento das transformações territoriais, contribuindo para o planejamento urbano e a gestão ambiental.

Introdução

O uso e a cobertura do solo são componentes dinâmicos da paisagem, continuamente modificados por processos naturais e, sobretudo, por intervenções antrópicas. Diante do crescimento populacional e da intensificação das demandas por desenvolvimento econômico, a expansão urbana e as atividades agrícolas destacam-se como os principais fatores das mudanças no uso e cobertura do solo (Roy *et al*., 2022; Vinayak; Lee; Gedem, 2021). Entre essas transformações, a expansão urbana exerce papel central ao substituir a cobertura natural por edificações e obras de infraestrutura, que acabam por promover a impermeabilização do solo (Batista *et al*., 2021; Lima; Lopes; Façanha, 2021). Por sua vez, a expansão das atividades agrícolas tem promovido cada vez mais a conversão de campos nativos em áreas de cultivo, conforme observado por Olivo (2021), resultando em redução de habitats e a descontinuidade espacial das áreas naturais, o que reforça o processo de fragmentação da paisagem.

Diante disso, o emprego de geotecnologias, como sensoriamento remoto, tem se demonstrado essencial à análise espaço-temporal das transformações territoriais, especialmente no que tange ao monitoramento do uso e cobertura do solo (Silva; Santos; Zebende, 2023). De forma complementar, o uso de métricas de paisagem permite quantificar atributos estruturais, como a fragmentação, conectividade e distribuição da paisagem. Dentre estas, pode-se destacar os índices de diversidade, como o de *Shannon* (H') (Shannon, 1948) e o de *Simpson* (D) (Simpson, 1949), os quais são amplamente utilizados para mensurar a heterogeneidade da paisagem. Nesse sentido, a utilização de dados geoespaciais, associada a ferramentas de geoprocessamento, tem se mostrado eficiente na análise das métricas de paisagem e no monitoramento das transformações do uso e cobertura do solo (Abreu, 2024), permitindo a identificação de padrões espaciais e processos de fragmentação (Arraz; Marques; Ribeiro, 2022; Beilfuss; Petsch; Trentin, 2025).

Estudos recentes indicam que variações nos índices de diversidade da paisagem podem refletir processos de fragmentação, evidenciados pelo aumento no número de fragmentos, redução do tamanho médio e perda de conectividade, comprometendo a integridade ecológica e não indicando necessariamente melhoria na qualidade ambiental (Mendonça; Gomes, 2025). Embora os avanços metodológicos e a ampliação da disponibilidade de bases espaciais tenham favorecido o monitoramento do uso e cobertura do solo em diferentes escalas, ainda são limitados os estudos que integram análise multitemporal, métricas de paisagem e índices de diversidade ecológica no contexto de centros urbanos. Essa lacuna é relevante porque limita a compreensão da evolução das classes de uso e cobertura do solo ao longo do tempo, assim como, a forma como essas mudanças reconfiguram a estrutura espacial da paisagem e afetam sua heterogeneidade. Assim, a ausência de estudos com esse enfoque integrado pode restringir a produção de diagnósticos mais consistentes sobre as transformações espaciais e seus efeitos ambientais em áreas expostas ao processo de urbanização.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo analisar a dinâmica do uso e cobertura do solo no centro urbano de Santa Maria, município localizado na região central do Rio Grande do Sul (RS), no período de 2014 a 2024, com base em métricas de paisagem e índices de diversidade ecológica. A análise desenvolvida busca compreender a evolução das classes de uso e cobertura do solo, a variação dos índices de diversidade de *Shannon* e *Simpson* e as mudanças na configuração espacial da paisagem, a partir das métricas *Patch Cohesion Index* (PCI), *Patch Density* (PD) e *Number of Patches* (NP).

Material e Métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado no centro urbano de Santa Maria, nas coordenadas geográficas de 29°41'3" S e 53°48.416' O. A localização do município é apresentada na Figura 01.

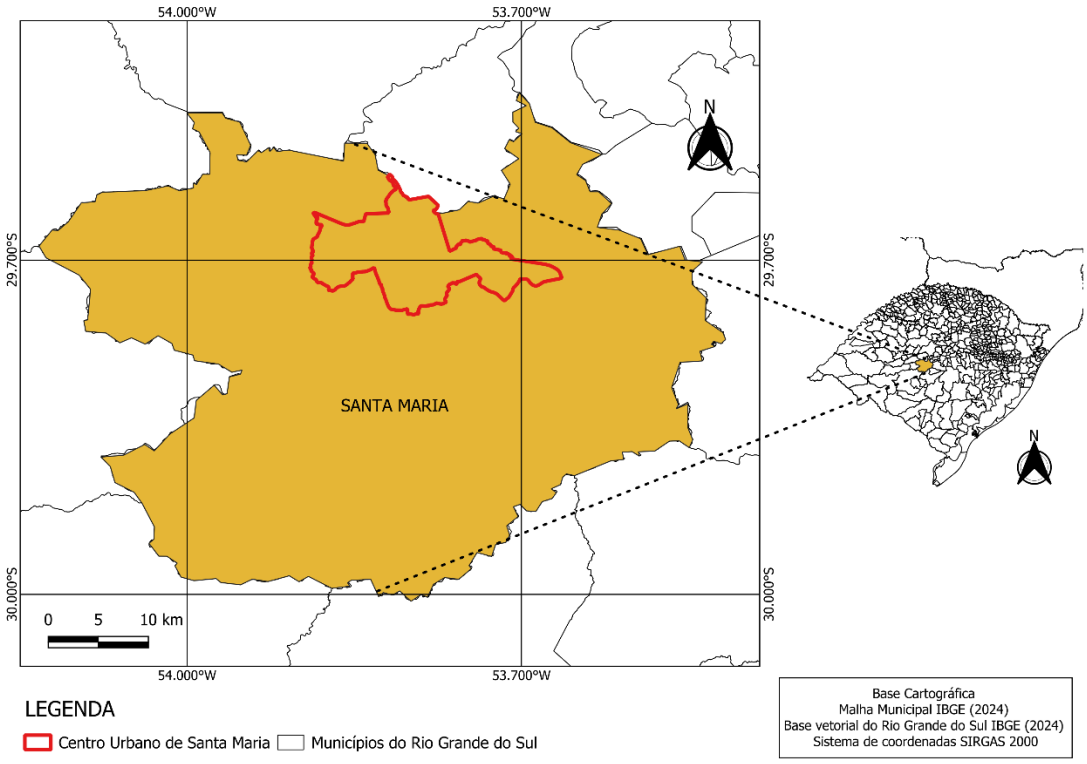


Figura 01: Localização do município de Santa Maria.
Fonte: Autores (2026)

O município de Santa Maria possui área territorial aproximada de 1.780,20 km^2 (IBGE, 2024), dos quais 126 km^2 correspondem à área urbana, a qual foi utilizada como área de análise no presente estudo. De acordo com Censo Demográfico do IBGE (2022) o município possui 271.735 habitantes, dos quais aproximadamente 95% residem no centro urbano. Essa concentração populacional está relacionada ao papel do município como polo econômico regional, com destaque para os setores de comércio, serviços e educação, que contribui para a atração populacional e o crescimento urbano (Maia; Strohaecker, 2023). Sua área urbana insere-se no sistema hídrico da sub-bacia do Rio Vacacaí-Vacacaí-Mirim, cujos principais afluentes são Arroio Araricá, Arroio da Divisa, Arroio do Meio, Arroio do Só, Arroio do Veado, Arroio Grande, Arroio Lobato, Arroio Tafona e a Barragem do Departamento Nacional de Obras e Serviços (DNOS) (Teixeira; Rizzati, 2022)

Em sua zona rural, predominam atividades agropecuárias, com destaque para o cultivo de arroz irrigado e soja (Silveira; Faccin; Krug, 2021). Segundo a classificação climática de *Köppen*, o clima predominante da região é do tipo Cfa, com estações úmidas e verões quentes (Grigoletti; Lazarotto; Wollmann, 2018). Em termos de vegetação, o município apresenta caráter de transição, abrangendo formações associadas à Floresta Estacional Decidual, pertencente ao bioma Mata Atlântica, e áreas campestres do bioma Pampa, o que confere elevada heterogeneidade ambiental à região (Werlang; Werlang, 2020). Em relação ao relevo, está situado em uma zona de transição entre o Planalto Meridional Brasileiro e a Depressão Central do Rio Grande do Sul, caracterizada por formas suavemente onduladas, com presença de colinas e baixas declividades (Silva; Mello; Salamoni, 2020).

Metodologia

Para analisar a diversidade e a configuração espacial da paisagem do centro urbano do município, foram utilizados rasters anuais de uso e cobertura do solo, obtidos a partir da plataforma MapBiomas, Coleção 10 para os de 2014 a 2024. Essa coleção disponibiliza mapas anuais gerados por meio de algoritmos de classificação baseados em aprendizado de máquina e

avaliados por procedimentos de validação realizados pelo próprio projeto (Mapbiomas, 2024). Estes, são gerados a partir de imagens de satélite *Landsat,* referente aos anos de 2014 até 2024, com resolução espacial de 30 x 30 metros e para delimitar a área de estudo foi usada a malha vetorial da área urbana, conforme limites estabelecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Para a análise das métricas de paisagem, ano a ano, foram consideradas doze classes de uso e cobertura do solo, sendo estas: Formação Florestal, Silvicultura, Campo alagado e Área Pantanosa, Formação Campestre, Pastagem, Mosaico de usos, Área Urbanizada, Outras Áreas não vegetadas, Rios, lago e Oceano, Soja, Arroz e Outras lavouras temporárias, apresentadas no Quadro 01.

Código MapBiomas	Classe de Uso e Cobertura do Solo
3	Formação Florestal
9	Silvicultura
11	Campo Alagado e Área Pantanosa
12	Formação Campestre
15	Pastagem
21	Mosaico de Usos
24	Área Urbanizada
25	Outras áreas não vegetadas
33	Rio, lago e oceano
39	Soja
40	Arroz
41	Outras lavouras temporárias

Quadro 01: Classes de uso e cobertura do solo utilizadas na análise.
Fonte: MapBiomas (2024).

Índices de diversidade e métricas de paisagem

Para a avaliação da diversidade da paisagem foram calculados os índices de *Shannon* e *Simpson* e, para a avaliação da configuração espacial da paisagem, por sua vez, foram calculadas as métricas *Patch Cohesion Index* (PCI), *Number of Patches* (NP) e *Patch Density* (PD) para cada classe.

Os índices de Shannon (H') e de Simpson (D) foram calculados com base na proporção ocupada por cada classe (p_i), considerando o número total de classes (m), conforme as Equações 01 e 02, respectivamente. H' é utilizado para mensurar a diversidade da paisagem, apresentando vantagem em relação a outros índices por considerar a riqueza e a equitabilidade (Cheng *et al.*, 2024). O índice de Simpson na forma 1 − D, representa a diversidade da paisagem, sendo D a probabilidade de que dois pixels selecionados aleatoriamente pertençam a diferentes classes de uso e cobertura do solo. (López *et al.*, 2020).

$$H' = -\sum_{i=1}^{m}(p_i ln\, p_i) \quad (01)$$

$$1 - D = 1 - \sum_{i=1}^{m} {p_i}^2 \quad (02)$$

O *Patch Cohesion Index* (PCI), calculado pela Equação 03, mede o grau de conectividade entre fragmentos de uma mesma classe na paisagem, de modo que valores mais elevados indicam maior conectividade. A métrica *Number of Patches* (NP), obtida através da Equação 04, corresponde ao número total de fragmentos de cada classe, sendo utilizada para avaliar sua divisão espacial. Já a métrica *Patch Density* (PD), determinada pela Equação 05, representa a densidade de fragmentos por unidade de área em m² e foi utilizada para avaliar o grau de fragmentação de cada uma das classes de uso e cobertura do solo, sendo que valores mais elevados indicam maior fragmentação.

$$PCI = \left[1 - \frac{\sum pij}{\sum pij\sqrt{aij}}\right] * \left(1 - \frac{1}{\sqrt{A}}\right)^{-1} * 100 \quad (03)$$

Onde: pij = perímetro do patch ij, a_{ij}= área do patch ij, A= área total da paisagem (m²).

$$NP = n \quad (04)$$

Onde: n = número de patches.

$$PD = \frac{n}{A} * 1.000.000 \quad (05)$$

Onde: n = número de patches, A = área total da paisagem (m²).

Destaca-se que os índices de diversidade e as métricas de paisagem, utilizadas no presente estudo, foram calculados ano a ano, no ambiente do *software* QGIS, por meio do *plugin* LecoS (*Landscape Ecology Statistics*) (Jung, 2022), a partir de *rasters* categóricos de uso e cobertura do solo obtidos na plataforma MapBiomas. Essa abordagem permitiu avaliar a heterogeneidade da paisagem, bem como a fragmentação e a conectividade das classes presentes no centro urbano do município de Santa Maria.

Resultados e Discussão

A partir dos resultados obtidos, foi observado que, ao longo do período de dez anos, ocorreram mudanças significativas nas classes de uso e cobertura do solo no centro urbano do município de Santa Maria. Essas alterações totalizaram aproximadamente 22,49 km², correspondendo a 17,85% do centro urbano analisado, evidenciando a dinâmica de transformação espacial no período analisado. A Figura 2, abaixo, apresenta as áreas que sofreram alterações entre os anos de 2014 a 2024.

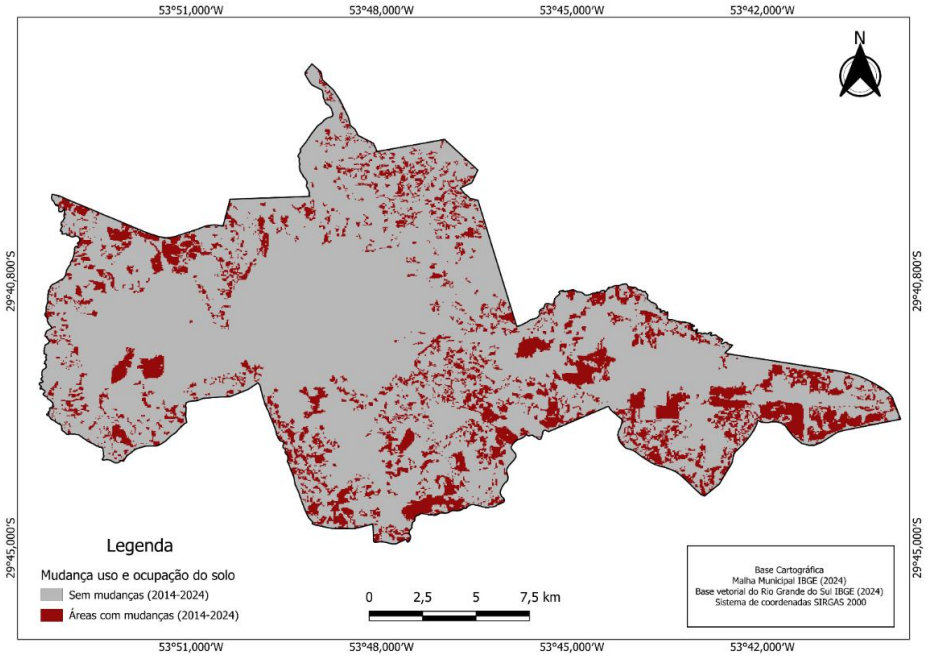


Figura 02: Áreas com alteração de classe de uso e cobertura da terra na área urbana de Santa Maria entre 2014 e 2024.
Fonte: Autores (2026)

Diante do exposto, verificou-se que houve um aumento de área nas classes de Formação Florestal, Silvicultura, Pastagem, Área Urbanizada, Outras Áreas não Vegetadas e Outras lavouras temporárias. Dentre estas, a classe de Área Urbanizada apresentou maior representatividade, com incremento de 52,38 km² em 2014 para 58,16 km² em 2024. No que se refere às áreas de vegetação natural, observou-se aumento na classe Formação Florestal, que passou de 17,96 km² em 2014 para 18,90 km² em 2024, o que pode estar associado a processos de regeneração natural, recuperação de áreas ou variações na classificação da base utilizada. Por outro lado, a classe Formação Campestre apresentou redução de 31,45 km² em 2014 para 23,84 km² em 2024, o que pode estar associada à conversão dessas áreas para expansão urbana ou usos agrícolas. Ademais, a análise espacial das mudanças no uso e cobertura do solo evidenciou que as alterações observadas ocorreram de forma dispersa no centro urbano analisado, com maior concentração nas porções sul e leste, indicando processos de expansão urbana e conversão de áreas anteriormente ocupadas por Formação Campestre e usos agropecuários. Em contrapartida, classes associadas à vegetação natural e a determinados usos agrícolas, como Formação Campestre, Mosaico de usos, Soja e Arroz, apresentaram redução ao longo do período analisado, sugerindo mudanças na configuração da paisagem urbana e rural, bem como transformações nos usos do solo.

A partir do cálculo dos índices de *Shannon* e *Simpson*, foi elaborada a Figura 03, que apresenta a variação temporal destes entre os anos de 2014 e 2024, bem como a evolução da Área Urbanizada no período. Com isso, observou-se que os índices de *Shannon* e *Simpson* apresentaram pequenas variações ao longo do período analisado, indicando relativa estabilidade na heterogeneidade geral da paisagem, embora tenha sido observada a expansão das Áreas Urbanizadas no município ao longo dos anos. Esses resultados sugerem que, apesar das alterações observadas no uso e cobertura do solo, especialmente à Área Urbanizada, a paisagem manteve um padrão de heterogeneidade relativamente constante. Resultados semelhantes foram observados por Pirovani, Silva e Santos (2015), que associaram a manutenção dos valores de *Shannon* à baixa alteração no arranjo espacial da paisagem.

Vale ressaltar que a variação evidenciada nos valores dos índices de *Shannon* e *Simpson* entre os anos de 2021 e 2022, observada na Figura 03, indicaram um momento de maior heterogeneidade na composição das classes de uso e cobertura do solo. Esse comportamento pode estar associado a alterações temporárias na configuração da paisagem, decorrentes de processos de transição entre diferentes usos do solo. Nos anos seguintes, os índices retornam a valores próximos aos observados no início

da série temporal, indicando estabilidade na diversidade da paisagem ao longo do período analisado. A estabilidade dos índices de diversidade não implica ausência de alterações estruturais na paisagem, podendo coexistir com processos de fragmentação, nos quais há reorganização espacial das classes sem mudanças expressivas na riqueza ou equitabilidade.

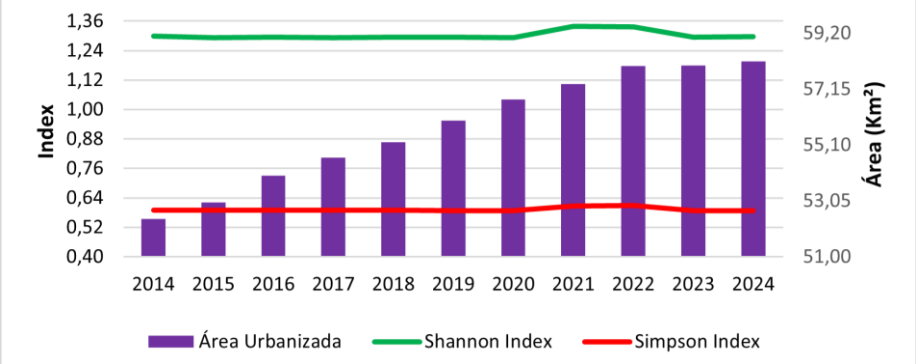


Figura 03: Variação temporal dos índices de diversidade da paisagem (*Shannon* e *Simpson*) e Área Urbanizada do município de Santa Maria (RS) entre 2014 e 2024.
Fonte: Autores (2026)

A análise de tendência temporal dos índices de diversidade apresentou baixos valores de coeficiente de determinação ($R^2 = 0,147$ para *Shannon* e $R^2 = 0,080$ para *Simpson*), indicando ausência de tendência linear significativa ao longo do período analisado. Esses resultados reforçam a estabilidade da diversidade da paisagem, apesar das mudanças observadas nas classes de uso e cobertura do solo. Resultados semelhantes foram observados por autores recentes, que associam alterações nos índices de diversidade da paisagem a processos de fragmentação, evidenciados pelo aumento no número de fragmentos e pela redução do seu tamanho médio, refletindo a substituição de áreas naturais por usos antrópicos (Mendonça; Gomes, 2025).

A partir dos cálculos das métricas de paisagem para as classes de uso e cobertura do solo, observou-se um aumento de *Number of Patches* (NP) na maioria das classes ao longo do período analisado, indicando maior fragmentação espacial. De forma semelhante, variações nos valores de *Patch Density* (PD) refletem mudanças na densidade de fragmentos na paisagem. Por outro lado, o *Patch Cohesion Index* (PCI) evidencia uma diferença na conectividade entre os fragmentos das classes analisadas. A Tabela 01 apresenta os valores das métricas de paisagem para as classes de uso e cobertura do solo.

Classe de uso e cobertura	NP 2014	NP 2024	PD 2014 (patches/km²)	PD 2024 (patches/km²)	PCI 2014	PCI 2024
Formação Florestal	346	357	2,231	2,301	9,763	9,752
Silvicultura	84	95	0,541	0,612	9,086	9,223
Campo alagado e Área pantanosa	52	37	0,335	0,238	7,673	7,326
Formação Campestre	502	595	3,237	3,836	9,850	9,788
Pastagem	159	156	1,025	1,005	7,510	8,311
Mosaico de usos	520	514	3,353	3,314	9,606	9,412
Área Urbanizada	24	35	0,154	0,225	9,943	9,946
Outras Áreas não vegetadas	48	61	0,309	0,393	7,515	9,288
Rios, lago e oceano	36	29	0,232	0,187	9,439	9,526
Soja	108	112	0,696	0,722	9,455	9,264
Arroz	6	9	0,038	0,058	8,901	9,341
Outras lavouras temporárias	237	155	1,528	0,999	8,836	9,341

Tabela 01: Métricas de paisagem (NP, PD e PCI) para as classes de uso e cobertura do solo no centro urbano do município de Santa Maria (RS) nos anos de 2014 e 2024.
Fonte: Autores (2026)

Conforme apresentado na Tabela 01, a classe Formação Campestre apresentou elevados valores de NP e PD, indicando maior fragmentação espacial no centro urbano analisado, ao passo que a Área Urbanizada apresentou baixos valores de NP e elevados valores de PCI, sugerindo maior continuidade e coesão espacial. A diminuição da Formação Campestre, associada ao aumento das áreas urbanizadas, indica uma reorganização espacial da paisagem, caracterizada pela consolidação do uso urbano e pela fragmentação das classes naturais, especialmente da Formação Campestre.

Destaca-se que o aumento de NP e PD, associado à redução da continuidade das classes naturais, reforça que a estabilidade dos índices de diversidade ocorre paralelamente a um processo de fragmentação estrutural da paisagem. Resultados semelhantes foram observados por Beilfuss, Petsch e Trentin (2025), que associaram a conversão de áreas naturais em sistemas antrópicos à fragmentação da vegetação nativa e à redução da conectividade ecológica.

De forma integrada, os resultados indicam que a dinâmica recente do centro urbano de Santa Maria (RS) é marcada pela expansão das áreas urbanizadas e pela reorganização estrutural do uso e cobertura do solo. Embora os índices de diversidade tenham apresentado variações discretas, sugerindo relativa estabilidade na heterogeneidade da paisagem, as métricas de fragmentação evidenciam a intensificação da fragmentação das classes naturais, especialmente da Formação Campestre. Esse padrão indica a substituição progressiva de áreas naturais por usos antrópicos, resultando em alterações na configuração espacial da paisagem, com implicações diretas na conectividade ecológica e na integridade dos sistemas naturais.

Considerações Finais

O presente estudo evidenciou mudanças expressivas no uso e cobertura do solo na área urbana do município de Santa Maria (RS) no período de 2014 a 2024.

A partir dos resultados obtidos, observou-se expansão expressiva da classe de Área Urbanizada, acompanhada por redução de classes naturais, especialmente da Formação Campestre, indicando transformação na configuração da paisagem e intensificação dos processos de ocupação do território. A análise das métricas de paisagem demonstrou que a expansão urbana esteve associada ao aumento da fragmentação de classes naturais, evidenciado pelo aumento nos valores de *Number of Patches* (NP) e *Patch Density* (PD), bem como alterações na conectividade espacial, indicadas pelo *Patch Cohesion Index* (PCI), especialmente entre classes naturais e antrópicas. Esses resultados indicam que, o crescimento urbano contribuiu para a subdivisão e redução da continuidade de áreas naturais. Por outro lado, os índices de diversidade da paisagem (*Shannon* e *Simpson*) apresentaram relativa estabilidade ao longo do período analisado, sugerindo que a heterogeneidade da paisagem foi mantida, mesmo diante das transformações observadas em classes específicas. Esse comportamento indica que a manutenção da diversidade composicional pode mascarar mudanças relevantes na configuração espacial da paisagem, especialmente quando ocorre substituição ou fragmentação de classes naturais.

Dessa forma, o uso integrado de dados de sensoriamento remoto, aliado à aplicação de métricas de ecologia da paisagem e índices de diversidade, mostrou-se eficiente para o monitoramento das mudanças de uso e cobertura do solo, permitindo compreender a dinâmica espacial e os processos de reorganização da paisagem. Por fim, ressalta-se a importância do monitoramento contínuo do uso e cobertura do solo como ferramenta fundamental para subsidiar o planejamento territorial e a gestão ambiental, contribuindo para a tomada de decisões voltadas ao desenvolvimento urbano sustentável e à conservação dos ecossistemas naturais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), por meio do Centro de Tecnologia, pelo suporte fornecido, bem como à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio institucional e financeiro (Código de Financiamento 001). Agradecem, ainda, o empenho e a colaboração dos membros do Grupo de Pesquisas em Modelagem Hidroambiental e Ecotecnologias.

Referências Bibliográficas

ABREU, Letícia Mussato de. **Dinâmica temporal do uso e cobertura da terra no município de Miranda-MS utilizando MapBiomas**. Orientador: Ariel Gomes Ortiz. 2024. 11 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Campo Grande, 2024.

ARRAZ, Rafael Miranda; MARQUES, Elineide Eugênio; RIBEIRO, Lucas da Silva. Análise da dinâmica temporal do uso e ocupação do solo no município de Conceição do Araguaia-PA (1985-2020). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, e37911831026, p. 1-12, jun. 2022.

BATISTA, Bárbara Alves; CORREIA FILHO, Washington Luiz Félix; OLIVEIRA JÚNIOR, José Francisco de; SILVA, Dimas de Barros Santiago; GOIS, Givanildo de; COSTA, Maria de Sant'Anna; SILVA JUNIOR, Carlos Antonio da. Avaliação da expansão urbana na Cidade de Maceió, Alagoas - Nordeste do Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, e253101119537, p. 1-14, ago. 2021.

BEILFUSS, Eric Moisés; PETSCH, Carina; TRENTIN, Romario. Fragmentação da paisagem causada pela recente expansão agrícola no município de Jari (RS). **Revista Continentes (UFRRJ)**, ano 13, n. 27, 2025.

CHENG, Siying; YANG, Xiaodong; YANG, Gang; CHEN, Binjie; CHEN, Daosheng; WANG, Jingzhe; REN, Kai; SUN, Weiwei. Using ZY1-02D satellite hyperspectral remote sensing to monitor landscape diversity and its spatial scaling change in the Yellow River Estuary. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 128, n. 103716, p. 1-15, abr. 2024.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados: Santa Maria, RS**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/santa-maria.html. Acesso em: 25 jan. 2026.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Santa Maria: panorama**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/santa-maria/panorama. Acesso em: 24 fev. 2026.

GRIGOLETTI, G.; LAZAROTTO, G.; WOLLMANN, C. A. Microclima urbano de áreas residenciais no período noturno: Estudo em Santa Maria, RS. **Sociedade & Natureza**, v. 30, n. 2, p. 140-163, 2018.

JUNG, Martin. **LecoS** - Landscape Ecology Statistics plugin for QGIS. Disponível em: https://plugins.qgis.org/plugins/LecoS/

LIMA, Silvia Maria Santana Andrade; LOPES, Wilza Gomes Reis; FAÇANHA, Antonio Cardoso. Alterações na Cobertura do Solo em Teresina, Piauí, Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 33, e58922, p. 1-13, jul. 2021.

LÓPEZ, Santiago; LÓPEZ-SANDOVAL, María Fernanda; GERIQUE, Andrés; SALAZAR, Joel. Landscape change in Southern Ecuador: An indicator-based and multi-temporal evaluation of land use and land cover in a mixed-use protected area. **Ecological Indicators**, v. 115, n. 106357, p. 1-13, ago. 2020.

MAIA, Joseli Andrades; STROHAECKER, Tânia Marques. A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e a sua rede de influência urbana regional. *In*: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL (ENANPUR), 20., 2023, Belém. **Anais [...]**. Belém: ANPUR, 2023. p. 1-18.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomas: Coleção 10 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. São Paulo: MapBiomas, 2024. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/

MENDONÇA, Anelise Coelho; GOMES, Ariel Ortiz. **Transformações no uso da terra e estrutura da paisagem na microrregião do Rio Miranda (MS), 1985-2023**. Orientador: Ariel Ortiz Gomes. 2025. 13 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Campo Grande, 2025.

OLIVO, Eduarda Fraga. **Dinâmica da paisagem nos Campos de Cima da Serra e a perda de habitat por *Cinclodes pabsti* Sick, 1969 (Furnariidae)**. Orientador: Jairo José Zocche. 2021. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas) – Curso de Ciências Biológicas, Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), Criciúma, 2021.

PIROVANI, Daiani Bernardo; SILVA, Aderbal Gomes da; SANTOS, Alexandre Rosa dos. Análise da paisagem e mudanças no uso da terra no entorno da RPPN Cafundó, ES. **Cerne**, v. 21, n. 1, p. 27-35, 2015.

ROY, Parth Sarathi; RAMACHANDRAN, Reshma M.; PAUL, Oscar; THAKUR, Praveen K.; RAVAN, Shirish; BEHERA, Mukunda Dev; SARANGI, Chandan; KANAWADE, Vijay P. Anthropogenic Land Use and Land Cover Changes-A Review on Its Environmental Consequences and Climate Change. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 50, n. 8, p. 1615-1640, ago. 2022.

SHANNON, Claude Elwood. A Mathematical Theory of Communication. **The Bell system technical journal**, v. 27, n. 3, p. 379-423, 1948.

SILVA, Edson Luiz Bortoluzzi da; MELLO, Luiz Fernando da Silva; SALAMONI, Gian Franco. Condicionantes geográficos e a forma urbana de Santa Maria, RS, Brasil. **Terra Plural**, Ponta Grossa, v. 14, e2013443, p. 1-22, 2020.

SILVA, Hismilei Chaves dos Santos; SANTOS, Joice de Jesus; ZEBENDE, Gilney Figueira. Uso do sensoriamento remoto na avaliação da dinâmica do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Rio Vaza Barris. **Sitientibus**, Feira de Santana, n. 64, e10344, p. 1-18, dez. 2023.

SILVEIRA, Rogério Leandro Lima da; FACCIN, Carolina Rezende; KRUG, Débora Frantz. A cidade média de Santa Maria e a gestão do território na Região Central-RS-Brasil. **Geosul**, v. 36, n. 80, p. 158-185, 2021.

SIMPSON, Edward H. Measurement of Diversity. **Nature**, v. 163, n. 4148, p. 688-688, 1949.

TEIXEIRA, Ariel Cezar; RIZZATTI, Maurício. Geotecnologias para avaliação de conflitos ambientais da sub-bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 44, e8, p. 1-24, abr. 2022.

VINAYAK, Bhanage; LEE, Han Soo; GEDEM, Shirishkumar. Prediction of Land Use and Land Cover Changes in Mumbai City, India, Using Remote Sensing Data and a Multilayer Perceptron Neural Network-Based Markov Chain Model. **Sustainability**, v. 13, n. 471, p. 1-22, jan. 2021.

WERLANG, Mauro Kumpfer; WERLANG, Elisa Piccolo. Diagrama ombrotérmico do bairro Camobi, Santa Maria, RS para o período 2010 a 2017. **Geografia Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, v. 23, e49, p. 1-15, fev. 2020.

AVALIAÇÃO DA RAZÃO IDEAL PARA ADSORÇÃO DE ARSÊNIO POR TURFA TROPICAL

1 Diogo Perez Monteiro Claro, 2 Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues, 3 Eduardo Anselmo Ferreira da Silva, 3 Carla Alexandra de Figueiredo Patinha

1Escola de Engenharia de São Carlos - USP, e-mail: diogo.pm.claro@usp.br; 2Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, e-mail: valguima@usp.br; 3Departamento de Geociências – Universidade de Aveiro, e- mail: eafsilva@ua.pt; cpatinha@ua.pt

Palavras-chave: Turfa; Arsênio; Adsorção.

Resumo

A intensificação de atividades antrópicas a partir da Revolução Industrial resultou de forma direta na contaminação de meio físicos naturais, em decorrência especialmente do descarte e lançamento inadequados de resíduos e efluentes contendo substâncias tóxicas, orgânicas e inorgânicas. A turfa é um material geológico sedimentar de caráter orgânico que tem sido amplamente estudado no contexto da sua aplicação como adsorvente de contaminantes metálicos, destacando-se pela elevada eficiência e baixo custo. Muitas dessas pesquisas utilizam turfas provenientes de climas temperados, onde sua formação é mais favorecida e, portanto, mais comum. Com isso, existe um déficit de conhecimento envolvendo processos adsortivos com turfas tropicais. Neste estudo, investigou-se a aplicação de turfa brasileira coletada na bacia do rio Mogi-Guaçu para a adsorção de arsênio (As), um metaloide de alta toxicidade, com o objetivo de avaliar a razão ideal entre a massa do adsorvente e o volume da solução contaminante para a aplicação desta matriz na remediação de áreas contaminadas em território nacional. A turfa utilizada foi submetida à razões entre 1/50 e 1/500 à concentração de 50 mg L^{-1} de arsênio (As), buscando identificar a proporção ideal da turfa em saturação adsortiva. Neste contexto, verificou-se que a melhor razão é 1/50, na qual se observou maior capacidade de adsorção.

Introdução

Com avanço e potencialização da industrialização à qual a humanidade sustentou seu desenvolvimento tecnológico e econômico após a revolução industrial e, especialmente, a partir da metade do século XX, tornou-se cada vez mais preocupante a pressão antrópica sobre o ambiente natural (Bilal et al., 2021). Essa pressão se traduz em impactos diretos sobre o meio ambiente, resultando em desequilíbrios nas diversas esferas naturais, em formas e escalas variadas (Calijuri; da Cunha, 2013). Sendo assim, uma das principais formas de degradação ambiental é a contaminação direta de um meio físico, que pode ser uma matriz geológica, um recurso hídrico ou o próprio ar, e se caracteriza pela introdução de substâncias químicas de interesse (SQI), de diferentes tipologias, provenientes de processos antrópicos e em concentrações não naturais (Brasil, 2013).

Essa degradação ocorre especialmente pelo descarte irregular de resíduos ou pelo lançamento inadequado de efluentes líquidos ou gasosos não devidamente tratados, contendo alguma SQI com potencial tóxico para organismos vivos, o que se correlaciona com diversas propriedades do próprio elemento, bem como com sua concentração em determinado meio (Salomons, 1995; Kabata-Pendias e Pendias, 1984). Caso essa concentração introduzida supere a capacidade de resiliência do meio, sua presença acarreta o desequilíbrio da biosfera, que pode ser expresso fisicamente, quimicamente ou biologicamente, sendo que quando isso ocorre o cenário passa a ser enquadrado como poluição ambiental (Connell, 2005). Buscando o controle da presença de tais poluentes no ambiente, é crucial que sua introdução seja controlada e, em caso de contaminação, que a remediação da área seja realizada adequadamente, buscando equilibrar as concentrações no ambiente (Noll; Gounaris; Hou, 1992). Nesse contexto, companhias e/ou órgãos ambientais são responsáveis por definir os valores de referência para essas substâncias no meio, a exemplo da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – Brasil (CETESB, 2023) que difere essas quantidades em valores de qualidade, de prevenção e de intervenção – para solo e água – a depender da substância e direcionam qual deve ser a medida a ser tomada por base nas concentrações medidas *in situ.*

Esses compostos, que atuam como contaminantes, podem ser classificados de diversas maneiras, sendo a mais comum a distinção entre orgânicos e inorgânicos, com base principalmente na presença ou na ausência de átomos de carbono (Pejon; Rodrigues; Zuquette, 2013). Dentre aqueles caracterizados como inorgânicos destaca-se uma categoria chamada de metais potencialmente tóxicos (MPT), elementos encontrados em séries de transição e nos grupos IIA, IIIB, IVB, VB e VIB da tabela periódica, apesar de que sua distinção pode ser realizada com base em sua massa específica (maior que 5 g cm^{-3}) ou por sua elevada toxicidade (Alloway, 1995), no qual são agrupados metais e metaloides com potencial de causar efeitos negativos à organismos, considerando também moléculas a base de arsênio, selênio e antimônio, com menores densidades, muitas vezes chamados também de “elementos traço” (Adriano, 1986; Kabata-Pendias; Pendias, 1984).

A periculosidade dessas substâncias está associada especialmente à ação tóxica sobre organismos vivos, permitindo que possam ser diferenciadas conforme a condição como essa se expressa; assim, tem-se: os teratogênicos, os mutagênicos e os carcinogénicos (Conell, 2005). Sendo que a contaminação de organismos por esses compostos pode ocorrer pelas chamadas vias de exposição, sendo essas as vias respiratórias, digestivas e cutâneas. Os efeitos nos organismos irão depender diretamente da via de exposição, além de cada metal tender a ser mais assimilado por uma determinada via (Swanson; Williams; He, 2023; Lima et al., 2023). Por demais, uma das características que influenciam o quão nocivo é um metal ou metaloide potencialmente tóxico é sua biodisponibilidade, ou seja, potencial de ser absorvido por organismos vivos (Stevenson, 1982; Alloway, 1995). Num contexto

ambiental, essa facilidade de absorção é diretamente correlacionada com a mobilidade do composto no meio físico, que, no caso dos metais, depende da sua especiação química, a qual, por sua vez, é frequentemente determinada pelas condições do meio, como pH e potencial de oxirredução (Smieja-Król; Pawlyta; Galka, 2022; Ferguson; Gavis, 1972).

O arsênio (As), um metaloide ou semimetal do grupo 15. O estado de oxidação que o elemento pode ser encontrado varia entre 5, +3, 0 e -3, o que interfere diretamente na mobilidade, estabilidade e toxicidade do mesmo (Ferguson; Gavis, 1972; Kabata-Pendias; Pendias, 1984). As formas mais frequentes na natureza são: (a) As^{3+}, a variante mais solúvel, e (b) As^{5+}, a espécie de maior grau de oxidação, portanto, menos móvel (Alloway, 1995). Uma das principais particularidades desse elemento é sua natureza aniônica, ao contrário da maioria dos metais potencialmente tóxicos, o que altera a maneira como ele reage com o meio físico ao seu redor (Sparks, 1995; Salomons, 1995). O As apresenta uma tendência natural à formação de óxidos e hidróxidos, como H_3AsO_3, em função do pH e do Eh do meio em que se encontra, além de atividades microbianas que podem transformar moléculas que o contêm.

Sua presença natural advém principalmente do intemperismo de rochas e minerais – como irita, calcopirita, esfalerita, galena, arsenopirita, enargita e tennantita – que contém traços do elemento, principalmente na forma de trióxido de arsênio (As_2O_3) (Costa Júnior, 1997; Arias; Barral; Mejuto, 2002). Todavia, concentrações elevadas desse metaloide são observadas apenas quando o mesmo é proveniente de atividades humanas, com destaque para a disposição incorreta de resíduos de mineração provenientes de etapas de lavra e beneficiamento de minérios de cobre, chumbo, zinco, prata e ouro que estão normalmente associados à esse metaloide, além de outros processos que envolvem combustão incompleta de combustíveis fósseis, fundição e uso composicional em químicos como pesticidas e produtos à base de nicotina (CETESB, 2023; Adriano, 1986; Alloway, 1995). No Brasil, a Resolução CONAMA 460/2013 define valores de intervenção para o As, sendo eles: 35, 55 e 150 mg kg^{-1} para áreas agrícolas, residenciais e industriais, respectivamente (Brasil, 2013).

O As é considerado um dos metaloides de mais elevada toxicidade em seres humanos, onde o contato ocorre essenciamente por via oral, podendo, no entanto, ocorrer também por inalação e via dérmica. Quando absorbido pelo organismo humano o As pode reagir com proteínas plasmáticas, sendo facilmente acumulado em órgãos como rins e fígado, onde muitas vezes espécies menos tóxicas são transformadas, através da redução por enzimas, em formas mais preocupantes, como o As^{3+} (ATSDR, 2007; WHO, 2001; Goyer; Clarkson, 2001), como por exemplo o ácido monometilarsônico. O As é classificado pela IARC como carcinogénico (1980)

Nesse contexto, é de extrema importância que sejam desenvolvidas alternativas tecnicamente e economicamente viáveis para a remediação de áreas contaminadas por substâncias como o As ou o tratamento de resíduos e efluentes que contenham o mesmo (Noll; Gounaris; Hou, 1992). Uma das técnicas mais amplamente estudadas é a estruturação de compostos capazes de adsorver esses contaminantes, imobilizando-os fisicamente e quimicamente, permitindo sua remoção do meio de interesse (Kiehl, 1985; Alleoni; Mello; da Rocha, 2009). A adsorção é um fenômeno físico-químico no qual uma substância em solução reage com sítios adsortivos de uma superfície, através de diferenças de carga, por forças de Van der Waals e interações eletrostáticas que promovem a troca ou compartilhamento de elétrons entre adsorbente e adsorvato (Rydin; Jeglum, 2013; Sparks, 1995). O potencial adsortivo de um sólido depende diretamente das propriedades do mesmo, assim como do meio, como pH, e sua afinidade com a substância a ser adsorbida, todavia, esse processo é amplamente conhecido e pode ter sua cinética descrita por equações de isotermas, que correlacionam a concentração no meio (Ce) e a quantidade imobilizada pela superfície (qe), as quais mais consolidadas são as isotermas Linear, de Langmuir e de Freudlich (Sposito, 1982; Langmuir, 1918; Weber, 1972).

As turfas são uma matriz geológica com elevada concentração orgânica e capacidade adsortiva, fazendo com que seu uso como técnica de remediação de áreas contaminadas seja amplamente avaliado em diferentes contextos (Huat et al, 2014). Arsone et al. (2013), por exemplo, avaliou de forma positiva a adsorção de As por turfa coletada na Letônia, já em contexto tropical Raimondi et al. (2021) constataram altas taxas de imobilização de chumbo, zinco e cádmio de turfa tropical proveniente do estado de São Paulo (Brasil).

As turfas, por sua vez, são materiais geológicos de caráter sedimentar, caracterizados especialmente pelo processo de formação. Este material difere de outros solos pelo soterramento de elevadas quantidades de materiais orgânicos de origem vegetal – de caráter arbustivo ou lenhoso, ou composto por algas – e pela posterior submersão, promovendo um meio anaeróbio ou anóxico no seu interior (IPT, 1979). Este procedimento extremamente particular promove condições favoráveis à decomposição lenta do material vegetal por comunidades microbianas capazes de produzir complexos orgânicos, como humina, e ácidos húmicos e fúlvicos (Kiehl, 1985; Tiwari et al., 2023). Essas substâncias, por sua vez, são responsáveis por conferir à turfa suas principais características, como alta capacidade de retenção de água e elevados índices de CTC e CTA, o que confere ao material superfícies coloidais capazes de formar ligações iónicas com contaminantes, sejam eles carregados positivamente ou negativamente (Sparks, 1995; Sposito, 1989). Neste contexto, este estudo tem por objetivo principal avaliar a melhor razão (solo/solução) na adsorção de As, sendo o material adsorvente uma turfa tropical coletada em Mogi-Guaçu (São Paulo – Brasil).

Materiais e Métodos

A turfa estudada foi coletada em 2017 às margens do rio Mogi-Guaçu, na zona rural do município de Luís Antônio (SP), (coordenadas: 21°35'53,2" S e 47°57'03,3" W). Essa turfeira é caracterizada por sua idade holocênica, com formação concatenada a zonas paludais costeiras e várzeas de planícies de inundação que, como resultado da associação direta com o corpo d'água de maior proximidade, conferem ao material textura majoritariamente fibrosa a hêmica e altos teores de cinza, estima-se também uma profundidade variável entre 1 e 3 metros (Cabral Júnior et al., 2001).

Com as amostras *in natura* devidamente separadas, foram submetidas a processos de homogeneização e preparação para utilização nos ensaios de adsorção. Assim, aproximadamente dois quilogramas da turfa foram secas à temperatura ambiente por um período de 15 dias para retirada da água intersticial sem alteração nas suas propriedades, seguidos de destorroamento por

maceração em almofariz de porcelana. Posteriormente, esse material já desagregado foi peneirado em peneira de 2 mm de abertura, o que permitiu isolar os finos ideais para o estudo proposto. Enfim, o material desejado foi quarteado seguindo o método de pilhas alongadas e separado em nove alíquotas iguais, acondicionadas em sacos de polietileno, conforme a metodologia empregada por Raimondi (2021).

Para a preparação da solução de As, empregou-se solução padrão da marca MERCK, com As em concentração isolada de 1000 mg L^{-1}, na forma de H_3AsO_4 (As^{5+}), em HNO_3 a 2-3%, e sua dissolução foi realizada utilizando água ultrapura. Para facilitar a concretização do objetivo do estudo, avaliar diferentes razões turfa/solução, optou-se por trabalhar com apenas uma concentração de As, eliminando uma variável. Dessa forma, a solução preparada foi de 50 mg L^{-1}, concentração elevada que, nas razões a serem testadas, permite uma maior saturação da turfa. A concentração utilizada é superior à empregada por Oliveira et al. (2014), que avaliaram a adsorção de As por turfa tropical, sem atingir a saturação completa do material.

Para os ensaios de adsorção envolvendo diferentes razões de turfa e solução, definiu-se um tempo de contato de 24 horas, sobre agitação, que representa um tempo de equilíbrio típico conforme a ASTM D4646 (2003), suficiente para saturar o material, e amplamente utilizado em estudos ambientais envolvendo adsorção por turfas de todo o mundo, como, por exemplo, Raimondi et al. (2021), Smieja-Król et al. (2022), Arsone et al. (2013), Koivula et al. (2009) e Crescêncio Júnior (2008) que alcançaram resultados expressivos utilizando de tal metodologia.

No ensaio de adsorção, trabalhou-se com solução de 50 mg L^{-1}, sendo fixado um volume de 45 mL de solução em cada frasco do tipo *falcon*. Foram selecionadas quatro razões para serem trabalhadas, abrangendo o intervalo entre 1/50 e 1/500, espectro que permite testar as principais proporções observadas na literatura, buscando avaliar o material tanto em condições mais favoráveis à adsorção quanto em situações mais limítrofes. Segundo Roy et al. (1992), o ideal é buscar uma razão em que a remoção de As pela turfa seja de aproximadamente 20%. A Tabela 01 apresenta os valores de massa empregados na preparação das quatro razões.

Razão turfa/solução (g/ml)	Massa de Turfa (g)	Volume solução As (mL)
1/50	0,90	45,0
1/100	0,45	
1/250	0,18	
1/500	0,09	

Tabela 01: Massas utilizadas em cada razão no ensaio preliminar de equilíbrio em lote (adsorção).
Fonte: Do Autor

Dessa forma, para cada razão proposta, foram preparadas triplicatas contendo turfa e a solução de As, além de brancos contendo apenas a turfa e água ultrapura, em todas as razões, assim como duplicatas constituídas apenas pela solução contaminante e pela água utilizada no estudo. Todas as amostras permaneceram em agitação à 30 rpm durante todo o período de contato de 24 horas, permitindo que a exposição do adsorvente ao adsorvato seja intensificada. Após o ensaio de adsorção os frascos foram submetidos a uma centrifugação a 3500 rpm durante 25 minutos com auxílio de centrífuga *Megafuge 16* da empresa *Thermo Scientific*, permitindo a separação dos precipitados e sobrenadantes, sendo posteriormente efetuada a coleta de alíquotas de 5 mL de cada amostra, que foram posteriormente submetidas à análise em ICP-MS para quantificação das concentrações de As em equilíbrio na solução.

Como mencionado anteriormente, a adsorção é um fenômeno fortemente influenciado pelas condições do meio, especialmente pelo potencial hidrogeniônico (Eh) e pela condutividade elétrica (ASTM D4319, 2001). Dessa forma, o pH e a CE foram medidos no início do ensaio, assim que iniciado o tempo de contato, e imediatamente ao fim do mesmo, após a retirada das amostras da centrifugação e de maneira prévia à separação das alíquotas. Para essa etapa foram utilizados um pHmetro *Hanna Instruments HI9025* com eletrodo de referência Ag/ClAg e um condutivímetro de marca *WTW* modelo *LF9*. Para avaliar as concentrações em equilíbrio de As, antes e depois da adsorção pelo material reativo, utilizou-se um equipamento analítico de espectrometria de massa acoplado indutivamente *Agilent 7700 Series ICP-MS* do fabricante *Agilent Technologies* associado à célula de colisão octopolar, seguindo o protocolo indicado pela metodologia de APHA (2012) para quantificar as concentrações do metalóide nas alíquotas anteriormente isoladas. A Figura 01 apresenta os equipamentos utilizados nesta etapa.



Figura 01: pHametro (A); Condutivímetro (B); ICP-MS (C).
Fonte: Do Autor

Para avaliar a remoção de As nas amostras, utilizou-se o percentual de As adsorvido pela turfa. Esse parâmetro pode ser descrito pela Equação 1, que correlaciona a concentração inicial de íons na solução (Co) e a concentração em equilíbrio após a adsorção (Ce), ambas expressas em mg L-1.

$$As\ removido\ (\%) = \frac{(C0-Ce)*100}{C0} \qquad (01)$$

Resultados e Discussão

A Figura 02 exibe os valores de pH iniciais e finais obtidos para cada triplicata e para cada razão testada. Nessa etapa pode-se observar inicialmente valores de pH entre 1,4 a 1,8. De modo geral, o pH final da razão 1/50 foi maior que o pH inicial, já para as razões 1/100, 1/250 e 1/500 o pH final foi menor que o inicial.

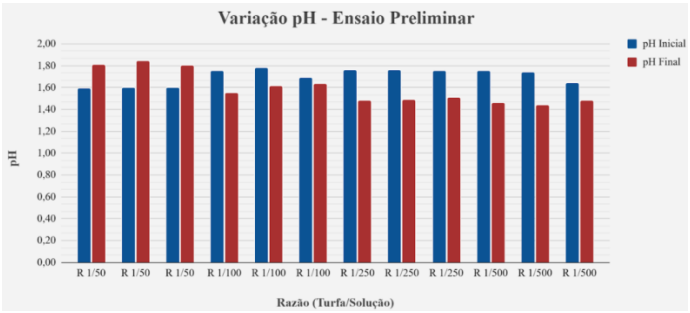


Figura 02: Valores de pHs iniciais e finais para amostras de turfa em contato com As em diferentes razões.
Fonte: Do Autor

Os valores de pH para os brancos preparados com turfa em contato com água ultrapura apresentaram caráter ligeiramente mais ácido que aqueles contendo apenas água da solução, sendo que quanto maior a massa de turfa maior a acidificação, indicando o conhecido pH mais baixo da matriz (Figura 03). Os brancos que continham apenas a solução contaminante destacaram-se por apresentarem baixos índices de potencial hidrogeniônico, evidenciando uma característica intrínseca à solução base, que tende a se refletir nos baixos valores de pH observados nas amostras ensaiadas.

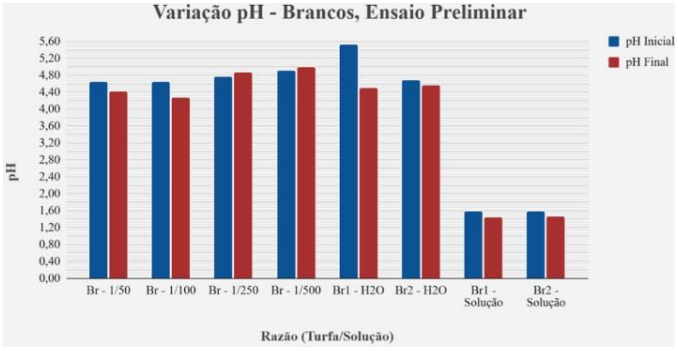


Figura 03: Valores de pH iniciais e finais para brancos de solução e de turfa empregados no ensaio de adsorção.
Fonte: Do Autor

Em todas as razões ensaiadas, a CE diminuiu ao final do ensaio, com alterações mais expressivas à medida que a massa de turfa utilizada aumentava, atingindo o máximo na proporção de 1/50, na qual a diminuição foi de 50%, comportamento associado à retirada de As do meio aquoso e à sua retenção na fase sólida, uma vez que esse elemento é o principal responsável pela elevada CE (Figura 04).

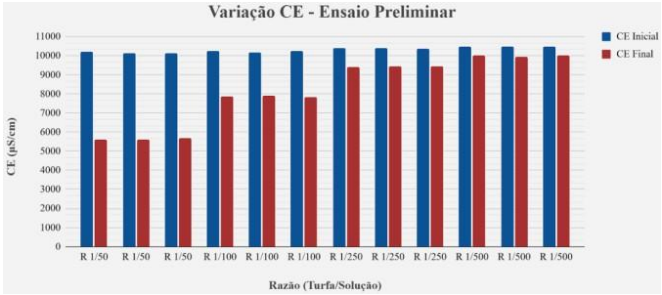


Figura 04: CE iniciais e finais para amostras de turfa em contato com As em diferentes razões.
Fonte: Do Autor

A Figura 05-A mostra que os brancos contendo apenas as soluções de As apresentaram valores muito elevados – na faixa de 10000 µS cm^{-1} – tanto inicialmente quanto ao final das 24 h, demonstrando que as altas condutividades medidas nas amostras de adsorção são referentes à essa solução. Os brancos contendo apenas turfa em água ultrapura (Figura 05-B) apresentaram condutividade ínfima, com o valor máximo registado de 52 µS cm^{-1}.

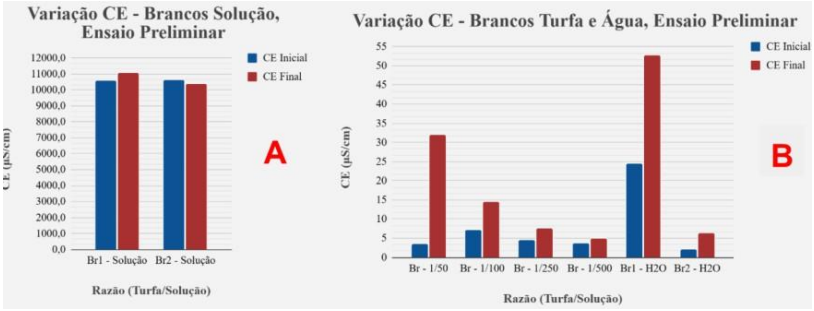


Figura 05: Valores de CE iniciais e finais para brancos de: solução (A); Turfa (B).
Fonte: Do Autor

Conforme descrito anteriormente, após o tempo de contato, foram retiradas alíquotas para quantificar a concentração residual de As na solução, permitindo comparar as quantidades do metal adsorvidas e em equilíbrio nas diferentes razões testadas (Figura 06). A priori, nota-se que a adsorção proposta não se deu de maneira muito expressiva, em que as concentrações adsorvidas foram inferiores às parcelas não adsorvidas em todas as razões, o que é esperado para massas tão reduzidas de adsorvente. Contudo, percebe-se um crescimento constante da quantidade imobilizada com o aumento da massa de turfa utilizada, sendo a razão 1/50 a mais eficiente, com concentrações retidas em torno de 11 mg L^{-1}.

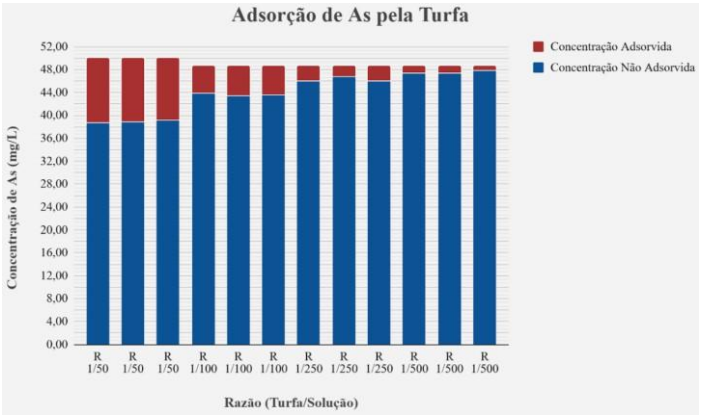


Figura 06: Concentrações adsorvidas e em equilíbrio após 24 horas de contato.
Fonte: Do Autor

Ao analisar as porcentagens de adsorção de As pela turfa pode-se observar que, de forma notória, houve correlação entre o aumento da massa de turfa utilizada e a quantidade de As imobilizada. Nesse contexto, consoante a Figura 07, a razão 1/500 apresentou menores taxas de adsorção, em torno de 2%, enquanto a razão 1/50, com maior massa de turfa, exibiu maior capacidade absortiva, com valores na faixa de 22% de retenção. Esse comportamento indica que a maior razão ensaiada será considerada ideal, com base nos parâmetros apresentados na metodologia deste estudo.

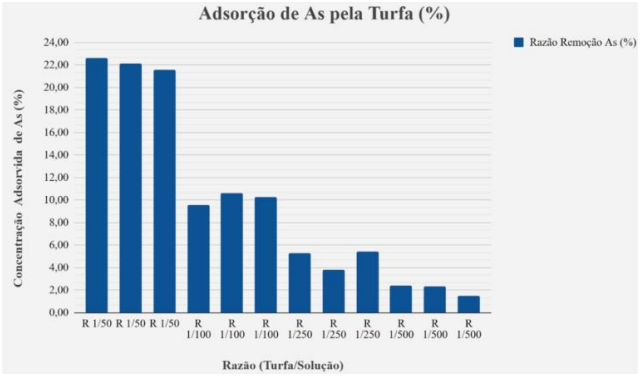


Figura 07: Porcentagens de adsorção após 24 horas de contato para diferentes razões.
Fonte: Do Autor

A maior parte dos estudos que avaliaram a razão ideal para estudos envolvendo adsorção de metais potencialmente tóxicos por turfas, sejam essas originadas em climas tropicais ou não, concluiu que o material pode ser trabalhado em relações mais limítrofes, ou seja, com menores massas de turfa em relação ao volume de contaminante. Com exceção dos estudos de Lima (2017) e Petroni (2004) com turfas brasileiras e de Koivula et al. (2009) com material amostrado na Finlândia, em que as razões ideais foram muito próximas das definidas neste estudo. Abordando especificamente a relação entre As e turfas, tanto de Oliveira et al. (2014), quanto Arsone et al. (2013) adotaram o uso de razões menores. Isso pode indicar que a turfeira avaliada neste estudo, apesar de apresentar potencial de adsorção de componentes metálicos, suas características físico- químicas fazem com que seu material se sature mais facilmente, provavelmente pela menor quantidade de sítios absortivos disponíveis e, como consequência, é preciso uma maior massa de adsorvente para atender às necessidades do estudo.

Considerações Finais

Avaliando os resultados apresentados, pode-se perceber que há potencial na aplicação da turfa tropical estudada na adsorção de contaminantes à base de As, uma vez que mesmo nas condições de estresse pelas baixas massas avaliadas ainda assim houve notória adsorção do elemento. Nesse contexto, como indicado pelas quantidades absolutas e percentuais adsorvidas pela turfa, percebe-se que, quanto maior a massa aplicada, maior o potencial de imobilização de As, resultado do aumento consequente no número de sítios ativos disponíveis para a retenção de íons, o que distorce o ponto de saturação da turfa.

No espectro de razões estudadas, a proporção 1/50 alcançou o percentual de 20%, que se tinha como objetivo. Essa razão deve então ser utilizada em futuros ensaios adsortivos, especificamente com material proveniente dessa turfeira localizada no estado de São Paulo, em contato de 24 horas com a solução de As previamente apresentada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de Iniciação Científica (Processo: 2025/25264-8; 2024/05811-1). Os autores agradecem também ao Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro – PT, assim como ao Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

Referências Bibliográficas

ADRIANO, D. C.; Trace elements in the terrestrial environments. New York: Springer-Verlang, 1986. 533p.

ALLEONI, L. R.; MELLO, J. W. V.; da ROCHA, W. S. D. Eletroquímica, Adsorção e Troca Iônica do Solo in MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. Química e Mineralogia do Solo - Parte II. 1a ed. Viçosa, MG. SBCS. 2009

ALLOWAY, B.J. Heavy Metals in Soils. 2a ed. Blackie Academic and Professional, Chapman and Hall, London. 368 p. 1995

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D4319: Standard Test Method for Distribution Ratios by the Short-Term Batch Method. 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D4646: Standard Test Method for 24-h Batch –Type Measurement of Contaminant Sorption by Soils and Sediments. 2003.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (ATSDR). Toxicological profile for Arsenic. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 2007.

ARIAS, M.; BARRAL, M.T.; MEJUTO, J.C. Enhancement of copper and cadmium adsorption on kaolin by the presence of humic acids. Chemosphere, v. 48, p. 1081 - 1088. 2002

ARSONE, L.; KLAVINS, M.; Eglite, L. Use of peat-based sorbents for removal of arseni compounds. Central European Journal of Chemistry. V.11. 2013

BILAL, M.; IHSANULLAH, I.; YOUNAS, M.; SHAH, M. Recent advances in applications of low-cost adsorbents for the removal of heavy metals from water: A critical review. Separation and Purification Technology. v. 278. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 460 de 2013 Altera a Resolução 420 de 2009, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e dá outras providências. 2013

CABRAL JUNIOR, M.; MOTTA, J. F. M.; MELLO, I. S. C.; TANNO, L. C.; SINTONI, A.; SALVADOR, E. D.; CHIEREGATTI, L. A.; Recursos minerais do fanerozoico do Estado de São Paulo. São Paulo, UNESP, Geociências, v.20, n.1, p.105-159, 2001.

CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F.; Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão. Rio de Janeiro. Elsevier. 2013.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas. Seção 1.2: Conceituação. 2023.

CONNELL, D. W. Basic Concepts of Environmental Chemistry. 4a ed. Griffith University, Queensland, Australia: CRC Press, 2005.

COSTA JÚNIOR, C. N. Caracterização mineralógica dos diferentes tipos de minérios e concentrado e flotação da mina morro do ouro, Paracatu-MG. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 1997.Crescêncio Júnior 2008.

CRESCÊNCIO JÚNIOR, Francisco. Estudo de turfas em laboratório como barreira reativa na remediação de aquíferos. 2008. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2008.

FERGUSON, J F.; GAVIS, J. (1972) A review of the arsenic cycle in natural wateß. I4/ater Research,v. 6, p. 1259- 1274. 1972 GOYER, R. A. & CLARKSON, T. W. Toxic effects of metals. Casarett and Doull s Toxicology - The Basic Science of Poisons. In: KLAASSEN, C. D. New York: Editora McGraw-Hill, 6 ed. 2001.

HUAT, B. B. K.; PROSAD, A.; ASADI, A.; KAZEMIAN, S.; Geotechnics of Organic Soils and Peat. CRC Press, 265p. 2014.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Estudo das possibilidades de aproveitamento de turfa no Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 1979. (Relatório 12.761).

- INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCII ON CANCER - IARC (1980) Monographs on the evaluaĺion of the carcinogenic risk of chemical to man: some metals and metallic compounds. Lyon, IARC. 2 v.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H.; Trace elements in soils and plants. 1oed, BocaRaton: CRC Press, 1984. 315p.Koivula, 2009.

KIEHL, E J. Fertilizantes organicos. São Paulo: Ceres. . Acesso em: 20 out. 2023. 1985

KOIVULA, M. et al. Sorption of Pb (II), Cr (III), Cu (II), As (III) to peat, and utilization of the sorption properties in industrial waste landfill hydraulic barrier layers. Journal of Hazardous Materials, Finland, v. 164, p. 345-352, 2009.

LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. Journal of American Chemical Society, v. 40, n. 9, p. 1361-1403, set. 1918. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja02242a004>.

LIMA, J. Z.; NAUERTH, I. M. R.; SILVA, E. F.; PEJON, O. J.; RODRIGUES, V. G. S. Competitive sorption and desorption of cadmium, lead, and zinc onto peat, compost, and biochar. Journal of Environmental Management V. 344. 2023.

LIMA, Jacqueline Zanin. Caracterização geológica-geotécnica e estudo da adsorção de Pb, Zn e Cd por turfa e compostos orgânicos. 2017. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2017.

NOLL, K.; GOUNARIS, V.; HOU, W-S. Adsorption technology: for air and water pollution control. Michigan: Lewis, c1992. 347 p. ISBN 0-87371-340-0.

OLIVEIRA, L.K., MELO, C.A., GOVEIA, D., LOBO, F.A., HERNÁNDEZ, M.A.A, FRACETO, L.F., & ROSA, A.H. (2014): Adsorption/desorption of arsenic by tropical peat: influence of organic matter, iron and aluminium, Environmental Technology, DOI: 10.1080/09593330.2014.939999

PEJON, O. J. e RODRIGUES, V. G. S. e ZUQUETTE, L.V. Impactos ambientais sobre o solo. Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão. Tradução. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013

PETRONI, S. L. G.; Avaliação cinética e de equilíbrio do processo de adsorção dos íons dos metais cádmio, cobre e níquel em turfa. Dissertação de Doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) - Autarquia associada à Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004. 134p.

RAIMONDI, I. M. Assessment of the use of tropical peats as local alternative materials for the adsorption of Pb, Zn and Cd: An equilibrium study. Earth Science Research Journal. V. 25, N. 1, p. 29 - 40. 2021

ROY, W. R.; KRAPAC, I. G.; CHOU, S. F. J.; GRIFFIN, R. A.; Batch type procedures for estimating soil adsorption of chemicals. Technical resource document. EPA/530-SW-87-006-F, Cincinnati, EUA. 1992.

RYDIN, H.; JEGLUM, J. K.; The Biology of Peatlands. Oxford University Press, second edition, 2013.

SALOMONS, W.; Environmental impact of metals derived from mining actives: processes, predictions, prevention. Journal of Geochemical Exploration, Elsevier, n.52, p. 5-23, 1995

SMIEJA-KRÓL, B.; PAWLYTA, M.; GALKA, M. Ultrafine multi-metal (Zn, Cd, Pb) sulfide aggregates formation in periodically water-logged organic soil. Science of the Total Environment V. 820. 2022.

SPARKS, D. L.; Environmental Soil Chemistry. Academic Press. 1995. 267p. SPOSITO, G.; The Chemistry of Soils. New York: Oxford University Press. 1989. 277p.
STEVENSON, F. J.; Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. New York: John Wiley and Sons. 1982. 496p.

SWANSON, Clifford S.; WILLIAMS, Justice M.; HE, Qiang. Risks of exposure to microbial contamination in eyewash stations. American Journal of Infection Control, [s. l.], v. 51, n. 7, p. 838-840, 2023. TIWARI, J.; AL RAMANATHAN; BAUDDH, K.; KORSTAD, J. Humic substances: Structure, function and benefits for agroecosystems—a review. Pedosphere.
v. 33, p. 237-249. 2023.

WEBER, W. J. Jr; Physicochemical processes for water quality control. Wiley-Interscience. Nova York, 1972. 640p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Arsenic. Geneva: WHO, 2001. 521 p. (Environmental Health Criteria, 18) (Task Group on Environmental Health Criteria for Arsenic, 2001, Stockholm).

MAPEAMENTO GEOLÓGICO NA SERRA DE SÃO JOSÉ, ENTRE CORONEL XAVIER CHAVES E PRADOS (MG) COMO SUBSÍDIO A GEOCONSERVAÇÃO AMBIENTAL

1 Bruno Henrique Moreno Ferreira Guimarães, 2 Charles Rayoni Bispo, 3 Pedro Henrique Duarte Galdino, 4 Luiz Carlos da Cruz

1 Centro Universitário de Belo Horizonte - UniBH, e-mail: guimaraesbruno.h@gmail.com; 2 Centro Universitário de Belo Horizonte - UniBH, e-mail: crbispo20@gmail.com; 3 Centro Universitário de Belo Horizonte - UniBH, e-mail: pedro.duartegaldino@gmail.com; 4 Centro Universitário de Belo Horizonte – UniBH. Prof. Orientador., e-mail: luiz.c.cruz@ulife.com.br.

Palavras-chave: Mapeamento metassedimentar; Caracterização geológica; Geoconservação.

Resumo

A Serra de São José, situada no centro-sul de Minas Gerais, compõe a borda sudeste do Cráton do São Francisco e integra a Faixa Brasília Meridional. Este estudo tem como objeto o mapeamento geológico de escala 1:10.000 da porção nordeste da serra, abrangendo áreas dos municípios de Coronel Xavier Chaves e Prados. O objetivo é caracterizar as unidades litológicas, estruturais e estratigráficas aflorantes. A metodologia compreende três etapas: revisão bibliográfica; levantamento pré-campo com análise de imagens orbitais; trabalho de campo com descrição tátil-visual dos afloramentos, coleta de amostras, medidas estruturais e uso de ferramentas geoespaciais; e, por fim, a sistematização dos dados em mapas, cortes geológicos e colunas estratigráficas. Os resultados indicam predominância de metassedimentos como quartzitos, metarenitos e metapelitos, com estruturas sedimentares preservadas e metamorfismo de baixo grau. Estruturas como foliações, dobras isoclinais e zonas de cisalhamento indicam regime tectônico compressivo, relacionado à Orogênese Brasiliana. Conclui-se que a área estudada representa um setor-chave para a compreensão da evolução tectono-estratigráfica da Faixa Brasília Meridional, além de fornecer subsídios para ações de geoconservação, valorização do patrimônio geológico regional e pesquisas posteriores.

Introdução

O mapeamento geológico detalhado constitui uma das principais metodologias para a investigação e interpretação dos elementos que compõem a dinâmica interna da Terra (Hatwig 2023). Trata-se de uma ferramenta imprescindível para a análise integrada dos processos geodinâmicos, das relações estratigráficas entre unidades rochosas e da reconstrução da história tectônica de determinada região (Schobbenhaus; Brito Neves, 2003). Ao fornecer uma representação sistemática e precisa das litologias, estruturas geológicas, contatos estratigráficos e feições deformacionais observadas em afloramentos, o mapeamento geológico não apenas sustenta interpretações sobre a evolução geológica regional, mas também estabelece uma base sólida para o desenvolvimento de pesquisas aplicadas em áreas como prospecção mineral, geotecnia, hidrogeologia e planejamento territorial (Hatwig, 2023).

Ademais, esse tipo de levantamento é fundamental para subsidiar políticas públicas e estratégias voltadas à gestão ambiental e à conservação do patrimônio geológico, especialmente em áreas de sensível interesse ecológico e turístico (Hatwig, 2023).

A Serra de São José, localizada na região do Campo das Vertentes, no centro-sul de Minas Gerais, representa uma geologia de grande relevância no contexto da borda sul do Cráton do São Francisco. Inserida na Faixa Brasília Meridional, essa serra exibe uma complexa associação de rochas metassedimentares pertencentes a megasequência São João Del Rei, cuja análise é essencial para o entendimento da evolução tectono-estratigráfica da região.

Dessa forma, os objetivos deste trabalho consistiram em: (i) identificar, reconhecer e representar as unidades litológicas presentes na área de estudo; (ii) mapear as principais estruturas geológicas, como falhas e dobras; (iii) classificar macroscopicamente as rochas e afloramentos encontrados; e (iv) analisar as relações entre as diferentes unidades geológicas e suas implicações tectônicas. Além de seu valor científico, o estudo contribui com informações relevantes para a preservação do patrimônio geológico e para o desenvolvimento de práticas sustentáveis no contexto do ecoturismo regional.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo a realização de um mapeamento geológico na escala de 1:10.000 da porção nordeste da Serra de São José, abrangendo áreas dos municípios de Coronel Xavier Chaves e Prados. O estudo visa compreender à caracterização das unidades litológicas, estruturais e estratigráficas aflorantes, integrando dados de campo e geoespaciais com base em uma abordagem metodológica estruturada e fundamentada teoricamente.

Referencial teórico

O mapeamento geológico é um dos principais instrumentos utilizados na investigação das unidades litoestratigráficas e na compreensão da dinâmica geológica de determinada região. Essa prática é fundamental não apenas para a caracterização das rochas e estruturas tectônicas presentes na superfície, mas também para a reconstrução da evolução geológica e paleogeográfica de grandes domínios tectônicos (Schobbenhaus e Brito Neves, 2003). A elaboração de mapas geológicos permite a identificação de padrões litológicos, estruturais e metamórficos, fornecendo subsídios para interpretações sobre os processos que moldaram a crosta terrestre ao longo do tempo geológico (Hatwig, 2023).

No contexto do Brasil, o mapeamento de terrenos metassedimentares inseridos em cinturões orogênicos neoproterozoicos, como é o caso megassequência São João Del Rei, tem desempenhado papel central na compreensão da evolução das faixas móveis brasileiras (Quevedo, 2023). Essa unidade, que integra o Domínio São João del-Rei, na Faixa Brasília Meridional, é composta majoritariamente por rochas pelíticas e psamíticas metamorfizadas em fácies que variam de xisto verde a anfibolito, com intercalações de mármores e quartzitos (Brasil, 2005). Tais características tornam a região objeto de interesse para investigações que buscam elucidar os processos de deformação e metamorfismo relacionados à colisão entre blocos continentais durante a Orogenia Brasiliana.

Além disso, os estudos sobre estruturas geológicas, como dobras, falhas e zonas de cisalhamento, contribuem significativamente para a compreensão do regime tectônico responsável pela deformação das unidades do megassequência São João Del Rei (CODEMIG, 2016). A análise estrutural integrada à cartografia geológica permite reconstruir os estágios de deformação que uma região sofreu, revelando a sequência de eventos tectônicos e os ambientes geodinâmicos envolvidos (Passchier e Trouw, 2005). Esses dados são essenciais para a construção de modelos evolutivos que considerem desde a deposição sedimentar até os episódios de metamorfismo e retrabalhamento estrutural (Hatwig, 2023).

Neste sentido, a Serra de São José representa um setor geologicamente estratégico para a compreensão da arquitetura interna da Faixa Brasília, reunindo condições ideais para o estudo de relações estratigráficas, feições estruturais e aspectos geomorfológicos associados à tectônica ativa e ao relevo residual da região do Campo das Vertentes.

Compartimentação geotectônica

A Serra de São José está localizada na borda meridional do cráton do São Francisco, destacada pela faixa brasiliana, uma província geotectônica caracterizada por uma série de cinturões orogênicos e terrenos altamente deformados (Figura 1) (Schobbenhaus; Brito Neves, 2003).

A região é atribuída à faixa móvel neoproterozoico-cambriana, resultado da orogênese Brasiliana no segmento da faixa Ribeira, contendo as rochas do embasamento e das mega sequências proterozoicas Andrelândia, São João del Rei e Carandaí (Ribeiro et al, 1995). Estas unidades metassedimentares proterozóicas estão correlacionadas a eventos deposicionais de um processo tectônico extensional reconhecido, o sistema de rifte Espinhaço, que compreende uma espessa sucessão sedimentar conhecida como Supergrupo Espinhaço (Figura 1) (Nepomuceno et al, 2020).

Com exceção do grupo Andrelândia, mostram metamorfismo sobreposto na fácies xisto verde e deformação fraca datada entre 600 milhões de anos atrás (Orogênese Brasiliana) como resultado do cinturão Ribeira/Araçuaí que se desenvolveu ao longo da franja sul do Cráton São Francisco (Figura 1) (Ribeiro et al, 2013). Desta forma, geralmente preservam estruturas e texturas sedimentares, permitindo a interpretação de sua história deposicional (Ribeiro et al, 2013).

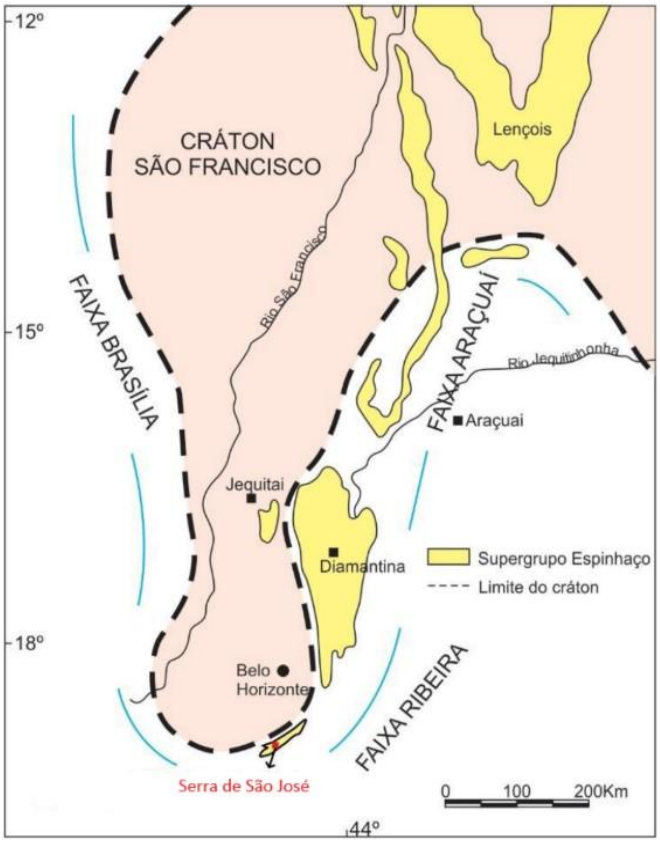


Figura 01: Localização da Serra de São Jose em relação ao Cráton São Francisco.
Fonte: Modificado de Ribeiro et al(2013)

Estratigrafia

A estratigrafia da Serra de São José, localizada entre os municípios de Prados e Coronel Xavier Chaves, apresenta um arcabouço geológico representativo da porção externa da Faixa Brasiliana (Figura 2), sendo caracterizada por metassedimentos proterozoicos do megassequência Andrelândia, associados à megassequência São João Del Rei (CODEMIG, 2003). Essa megassequência repousa em discordância sobre um embasamento arqueano-paleoproterozoico e é composta por litotipos predominantemente quartzíticos, metareníticos e metapelíticos, com variados graus de metamorfismo e deformação (Ribeiro et al, 2013).

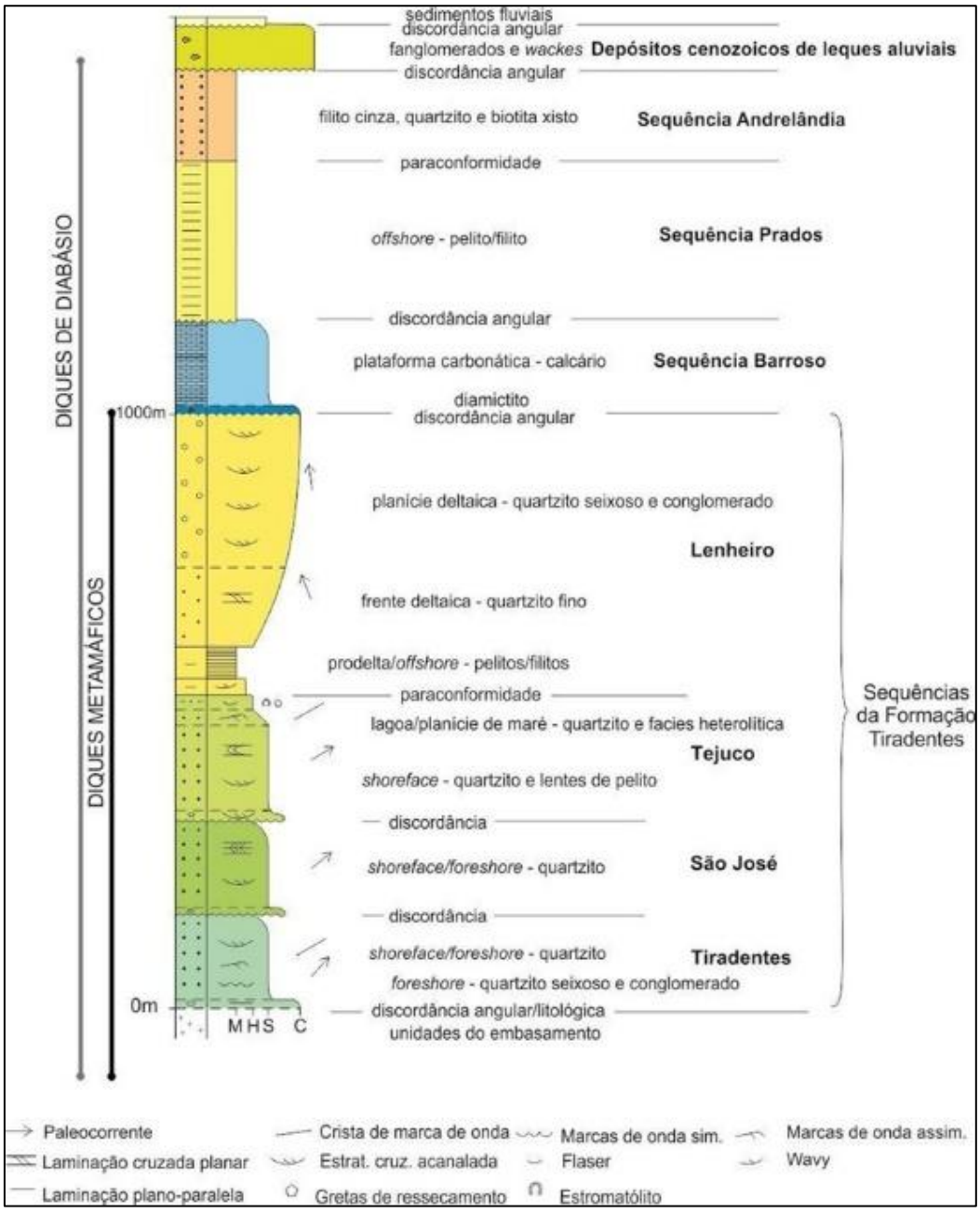


Figura 02: Coluna estratigráfica da região da Serra de São José. Fonte: Modificado de Ribeiro et al (2013)

No mapeamento realizado pelo grupo, foram identificadas três unidades principais: Metarenitos, quartzitos e metapelitos, com características diagnósticas bem definidas. Os metarenitos, predominantes em áreas de menor elevação, apresentam granulometria fina a média, coloração clara (bege a rósea) , compostos por quartzo e feldspato, eventualmente com presença de clastos, suportados por uma matriz arenosa. Algumas amostras indicam processos de oxidação (coloração alaranjada), bem como presença de manganês, detectada pela reação com peróxido de hidrogênio. Essas litologias são compatíveis com os depósitos da Sequência Tejuco e Lenheiros, da Formação Tiradentes, pertencentes a megassequência São João Del Rei, que refletem ambientes fluviais de frentes deltaicas de energia moderada (Ebert, 1967; Ribeiro et al., 2013).

Os quartzitos, localizados principalmente nas áreas de maior elevação, são rochas de alta dureza, pouco friáveis, com cristais de quartzo bem desenvolvidos. No topo da serra, observou-se aumento na granulometria dos cristais (> 0,3 mm), bem como preservação de estruturas sedimentares como estratificações cruzadas e plano-paralelas. Tais feições são típicas de dunas subaquáticas, indicando um ambiente deposicional de alta energia (Leonardos, 1940). Estas unidades correspondem às formações mais quartzíticas da Sequência São José, também integrante Formação Tiradentes (CODEMIG, 2003).

Os metapelitos, por sua vez, ocorrem nas porções mais intemperizadas da área, geralmente em zonas de menor relevo. Estas rochas são macias, friáveis, com textura siltosa, ricas em mica e caulinita, e com evidências de alteração química (oxidação superficial). Essas características indicam um ambiente deposicional de baixa energia, como planícies aluvionares. A composição e o grau de alteração dessas rochas permitem correlaciona-las à Formação Prados, pertencente à megassequência Carandaí, sobreposta à megasequência São João Del Rei e ao embasamento (Silva et al., 1978).

Evolução geológica

A história geológica da área revela uma trajetória complexa, iniciada com a deposição de sedimentos em bacias de subsidência intermontana, ou seja, é uma bacia formada em um quadro de subsidência tectônica, durante o Proterozóico, que implicou em um rebaixamento do relevo e consequentemente favorecendo a deposição (Ribeiro, 1997). Os metassedimentos da região foram posteriormente submetidos a episódios de deformação e metamorfismo relacionados à Orogênese Brasiliana, evento tectônico neoproterozoico que afetou amplamente o sul do Cráton São Francisco (Ribeiro et al., 2013).

Em rochas submetidas a deformações regionais, os sedimentos são dobrados, foliados e parcialmente recristalizados (Passchier e Trouw, 2005). A foliação é evidenciada por orientação preferencial de minerais micáceos e associadas a dobras assimétricas (Passchier e Trouw, 2005). O metamorfismo registrado é predominantemente de fácies xisto verde, com localizados indícios de fácies superiores em setores mais internos da megassequência. Nos metapelitos, identificou-se granada, muscovita e clorita, sugerindo condições de temperatura e pressão elevadas, compatíveis com zonas de deformação crustal média a profunda (Silva et al., 1978; CODEMIG, 2003).

Apesar do grau metamórfico regional, as rochas submetidas preservam estruturas sedimentares primárias, como acamamentos e estratificações (Ribeiro et al, 2013). A presença destas feições indica que o metamorfismo, embora expressivo, não foi suficiente para obliterar completamente as feições deposicionais originais, permitindo interpretações paleoambientais seguras (Pettijohn, 1975; Yardley, 1989).

Metodologia

Trata-se de uma pesquisa aplicada, de natureza qualitativa e caráter exploratório, A abordagem qualitativa foi adotada por privilegiar a interpretação aprofundada dos fenômenos naturais observados e analisados no contexto geológico. Ressalta-se que não houve necessidade de submissão ao Comitê de Ética em Pesquisa, uma vez que o estudo não envolveu seres humanos nem animais.

No presente estudo, foi realizado o mapeamento geológico da porção nordeste da Serra de São José, localizada entre os municípios de Coronel Xavier Chaves e Prados, na região do Campo das Vertentes, em Minas Gerais. A área mapeada compreende cerca de 6 km² e foi percorrida ao longo de aproximadamente 15 km (Figura 3).

O acesso à área de estudo se dá pela Rodovia MG-040, com saída de Belo Horizonte em direção a São João del-Rei, seguindo até o município de Coronel Xavier Chaves (Figura 3). O deslocamento até os principais afloramentos ocorreu por trilhas públicas e vias localizadas em propriedades privadas, sendo o acesso em certos pontos dificultado pela topografia e pela vegetação densa.

A investigação foi estruturada em três etapas principais: pré-campo, campo e pós-campo. Na fase de pré-campo, procedeu-se à análise de imagens de satélite e fotografias aéreas da região, com o intuito de identificar e mapear feições geológicas relevantes. Utilizou-se os softwares QGIS (versão 3.40.4) e Google Earth Pro (versão 7.3.6.10201) para o processamento e integração das informações geoespaciais, viabilizando a construção de mapas temáticos. Os dados cartográficos foram obtidos em fontes oficiais, como o Portal da Geologia.

A etapa de campo ocorreu entre os dias 26 e 30 de outubro de 2024, com a coleta de amostras de rochas, medidas estruturais com bússolas geológicas, registros fotográficos dos afloramentos e georreferenciamento dos pontos de coleta com coordenadas UTM. Foram empregados o GPS de mão e os aplicativos Avenza Maps (versão 5.3.3 (214)) e CLINO (versão 3.0.6), garantindo precisão mesmo em áreas sem conectividade.

Na etapa de pós-campo, os dados obtidos foram sistematizados, organizados e interpretados à luz da literatura especializada, permitindo a elaboração de um modelo geológico para a área estudada, que sintetiza a evolução tectônica e as estruturas geológicas observadas in loco.

Resultados e Discussões

A área de interesse do mapeamento, considerado como base para o presente estudo, está localizada entre os municípios de Prados e Coronel Xavier Chaves no estado de Minas Gerais, na região central do estado, conhecida como Campo das Vertentes (Figura 3). É uma área de grande interesse geológico e turístico pois a geografia física desta área é marcada pela presença de afloramentos rochosos, paisagens montanhosas e cachoeiras. Esses elementos são resultantes de complexos processos geológicos que moldaram a região ao longo do tempo.

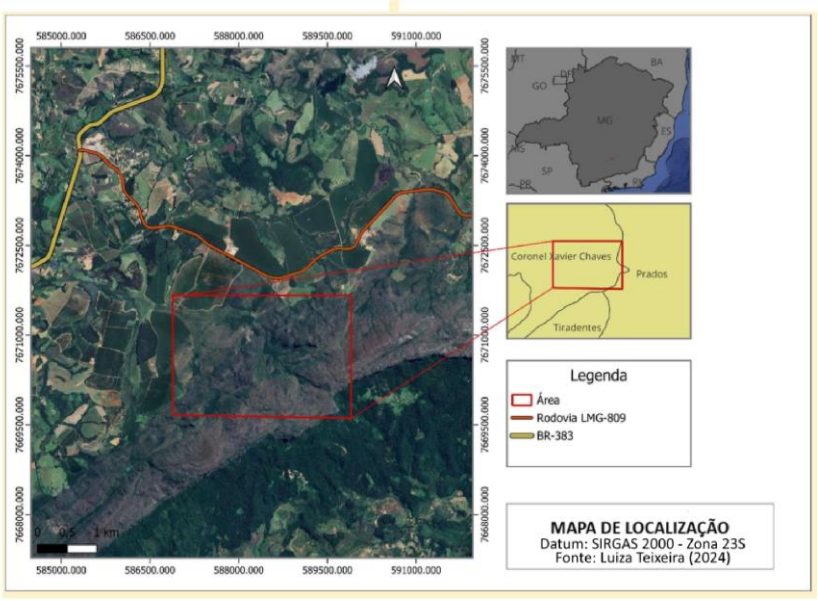


Figura 03: Figura da área de interesse. Fonte: Luiza Teixeira 2024.

Caracterização das unidades geológicas

As observações sistemáticas realizadas durante o trabalho de campo revelaram a presença de distintas unidades litológicas compostas predominantemente por rochas metassedimentares, evidenciando diferentes graus de metamorfismo e variações composicionais. Foram identificadas três principais litologias: metapelitos, metarenitos e quartzitos (Figura 4). O uso do prefixo "meta" justifica-se pela constatação de transformações mineralógicas, estruturais e texturais nos litotipos analisados, indicativas de processos metamórficos já iniciados.

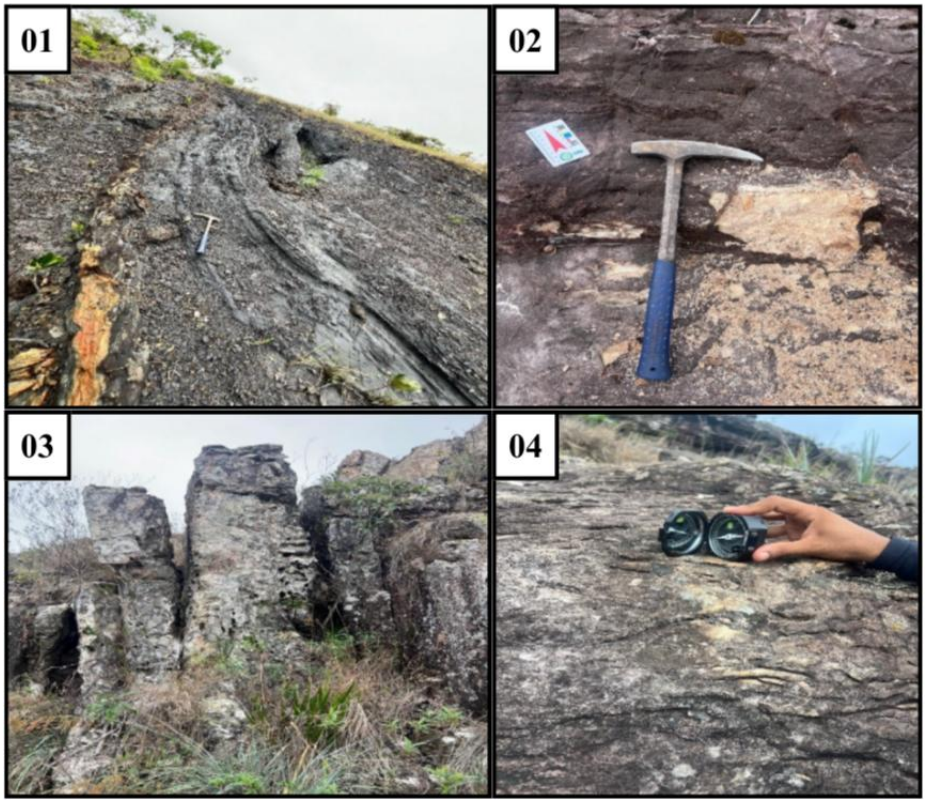


Figura 04: (1) Afloramento de metapelito evidenciando estratificações plano-paralelas bem desenvolvidas e dobras resultantes de tensões deformacionais; (2) Afloramento de metarenito exibindo acamamentos regulares e variação granulométrica; (3) Afloramento de quartzito apresentando zonas com grau avançado de alteração superficial devido à ação de processos intempéricos, preservando feições de estratificação cruzada; (4) Registro da medição com bússola geológica tipo Brunton em afloramento de quartzito, utilizado para determinar a orientação e o mergulho das camadas. Fonte: Bruno Guimarães, 2024.

A análise integrada dos dados de campo, informações laboratoriais e mapas geológicos de referência possibilitou uma interpretação abrangente das características geológicas da área em estudo. A discussão dos resultados foi estruturada em dois eixos principais: (i) A interpretação das unidades litológicas e estruturas geológicas, e (ii) a correlação dessas unidades com o contexto estratigráfico regional.

Os metapelitos apresentaram acamamentos bem desenvolvidos, associados a ambientes de baixa energia, como planícies fluviais e zonas lacustres (Resende Madeira *et al.,* 2019). Por sua vez, os quartzitos e os metarenitos exibiram estratificações cruzadas, típica de sistemas deposicionais de alta energia, como ambientes deltaicos ou dunas subaquáticas. As variações na orientação e no mergulho das camadas apontam para uma dinâmica deposicional complexa, relacionada a um cenário transicional influenciado por processos tectônicos (Figura 4).

A caracterização litológica foi associada às seguintes formações estratigráficas regionais: os metarenitos foram correlacionados à Formação Tiradentes, pertencente à Sequência Tejuco e Lenheiros, sendo compatíveis com depósitos fluviais deltaitcos e marinhos submetidos a moderado metamorfismo. Os quartzitos também foram relacionados à Formação Tiradentes, destacando-se por sua granulação homogênea e estruturas sedimentares remanescentes. Já os metapelitos foram correlacionados à Formação Prados, caracterizados por textura fina, presença de minerais argilosos (como caulinita) e elevada friabilidade, sugerindo sedimentação em ambientes de baixa energia (Figura 9).

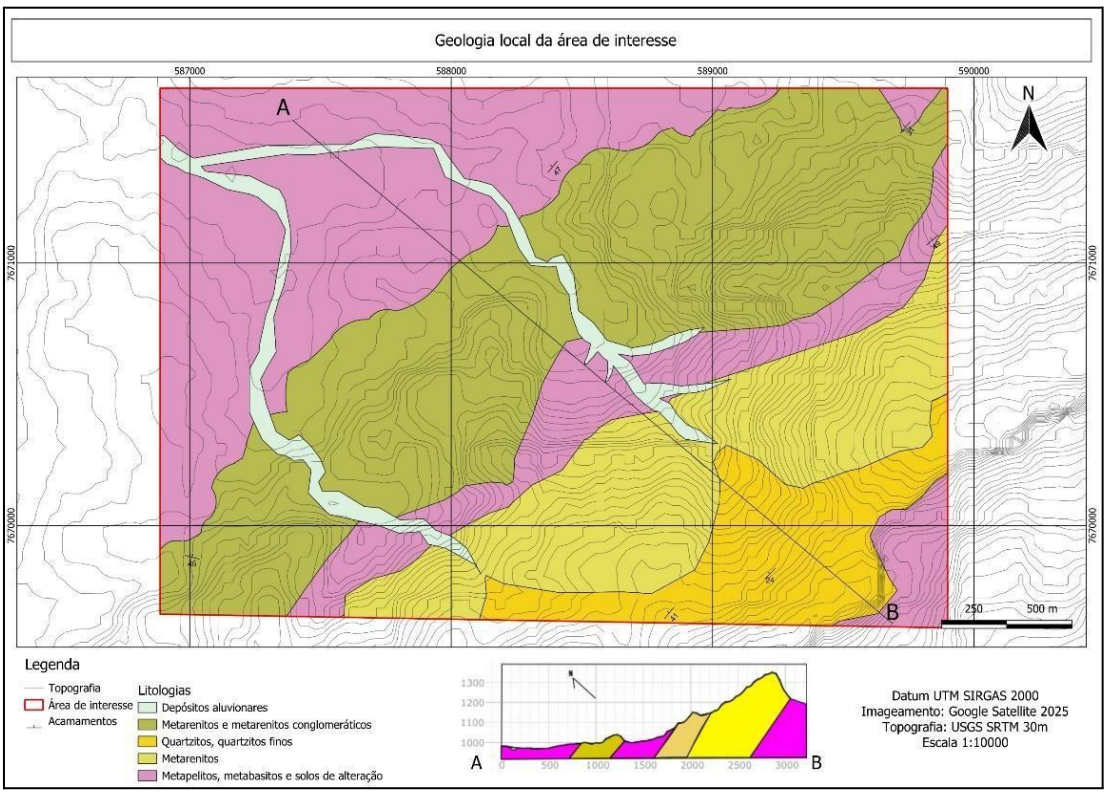


Figura 08: Mapa Geológico para a área de São José. Fonte: Pedro Henrique Duarte Galdino, 2025.

Conclusões

O mapeamento geológico localizado na Serra de São José, permitiu um entendimento abrangente das características litológicas, estruturas sedimentares e deposicionais da região, contribuindo para entender melhor a evolução geológica tanto local quanto regional. A abordagem integrada adotada foi fundamental para a realização de todas as etapas planejadas.

Foi evidenciado a atuação significativa de processos metamórficos regionais e eventos tectônicos de larga escala. As estruturas sedimentares preservadas possibilitaram inferências sobre os paleoambientes deposicionais e os mecanismos deformacionais atuantes. A integração dos dados de campo com os mapas geológicos regionais resultou na elaboração de um modelo geológico para a área da Serra de São José, reforçando a importância do mapeamento geológico detalhado como ferramenta essencial para a compreensão da evolução tectono-sedimentar da Formação Tiradentes e da megasequência São João Del Rei.

O objetivo principal, de realizar o mapeamento geológico da área, foi alcançado com a identificação, análise e mapeamento dos domínios litológicos predominantes, formados por metarenitos, quartzitos e metapelitos. A confecção do mapa geológico detalhado e a elaboração do relatório técnico permitiram registrar de forma sistemática as características geológicas, alinhando os resultados ao contexto regional.

Os objetivos específicos, foram alcançados ao reconhecer e descrever as unidades litológicas presentes na área de estudo, caracterizando suas variações texturais, mineralógicas e estruturais. As observações feitas em campo foram complementadas posteriormente em laboratório. O destaque foi dado às granulometrias e estruturas sedimentares, que permitiram

inferir os paleoambientes deposicionais, isso também possibilitou correlacionar as rochas encontradas com as formações regionais, como a Formação Tiradentes para metarenitos e

quartzitos, e a Formação Prados para os metapelitos. Esses resultados foram essenciais para a análise das relações entre as diferentes unidades geológicas e suas implicações tectônicas, demonstrando como os processos de sedimentação, metamorfismo e deformação moldaram a área estudada.

As limitações de acesso restringiram uma maior abrangência de mapeamento dentro da área de interesse. Obstáculos como mata extremamente densa e fechada, acessos restritos por área privada, além de contato com animais peçonhentos, impactaram de forma significativa o que foi previamente definido. Possivelmente, a disponibilidade de mais dias de campo seria ideal para que tais imprevistos pudessem ser reavaliados, não impactando o desenvolvimento do trabalho. Ademais, foi identificado que para uma maior compressão da geologia local, seria relevante estudos mais aprofundados, que vão além da descrição tátil-visual. A realização de análises petrográficas em lâminas delgadas, permite uma melhor observação microscópica, o que também permitiria uma análise mais aprofundada da mineralogia e dos processos metamórficos atuantes nas litologias da região. Dessa forma, o mapeamento realizado pode contribuir com pesquisas futuras a serem realizadas no local.

Agradecimentos

Agradecimento ao Centro Universitário de Belo Horizonte – Campus Buritis, pelo suporte institucional e acadêmico oferecido durante o desenvolvimento desta pesquisa. Reconhece-se o apoio técnico do Laboratório de Geologia e dos professores envolvidos, cujas orientações foram essenciais para a execução das atividades de campo e análise dos dados. Aos colegas que contribuíram direta ou indiretamente com sugestões, revisões e apoio logístico, expressa-se sincera gratidão. Estende-se ainda o agradecimento às comunidades dos municípios de Coronel Xavier Chaves e Prados, pela receptividade e pelas informações prestadas durante as visitas de campo. Esta pesquisa só foi possível graças à articulação entre conhecimento científico, suporte institucional e colaboração mútua.

Referências Bibliográficas

ARRUZZO, Fernando Augusto. **Mapeamento geológico estrutural da Formação Tiradentes, Mesoproterozóico, São João del Rei, Minas Gerais.** 2016. Monografia (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

AVENZA SYSTEMS INC. ***Avenza Maps***, versão 5.3.3 (214). [aplicativo móvel]. 2024. Disponível em: https://www.avenzamaps.com/.

BRASIL, CPRM-SERVIÇO GEOLÓGICO DO. **PROGRAMA GEOLOGIA DO BRASIL**

Contrato CPRM-UERJ Nº. 057/PR/05.

COELHO, Juliano Oliveira Martins; ZAINE, José Eduardo; RODRIGUES, Flávio Henrique. **Análise fisiográfica, a partir de técnicas de fotointerpretação, aplicada ao mapeamento geológico-geotécnico de obras rodoviárias.** Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, n. 68/10, p. 2063–2082, nov./dez. 2016.

CODEMIG – COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS

GERAIS. **Programa Geologia do Estado de Minas Gerais: Projeto São João del Rei**. Belo Horizonte, 2003.

EBERT, Hans. Dieter. **Estratigrafia da região de São João del Rei.** Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia, DNPM, Rio de Janeiro, n. 241, p. 1–79, 1967.

FERREIRA, Gabriela Boonen. **Estratigrafia e paleoambientes na sucessão basal da Formação Tiradentes, Mesoproterozóico, São João del Rei, Minas Gerais.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: **Atlas**, 2002.

GOOGLE INC**.** ***Google Earth Pro***, versão 7.3.6.10201. [software]. 2025. Disponível em: https://www.google.com/earth/.

HARTWIG, M. E. et al. **Diretrizes para o mapeamento geológico em disciplinas de graduação**. *Terræ Didatica*, v. 19, p. 1-12, e023012, 2023.

GONÇALVES, Lucas Arienti. **Estratigrafia e evolução paleoambiental da Sequência** (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

HEILBRON, Monica et al. Província mantiqueira. **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, p. 203-235, 2004.

LEONARDOS, Octávio. Honório. **As formações quartzíticas de Minas Gerais**. Boletim do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil, Rio de Janeiro, n. 105, p. 1–45, 1940.

MIDLAND VALLEY. ***Clino – Geological Compass***, versão *Field move Clino Pro* 3.0.6.

[aplicativo móvel]. 2024. Disponível em: https://www.seequent.com/products/clino/.

NEPOMUCENO, Francisco. et al. **Rifting polifásico mesoproterozóico e inversão tectônica: o exemplo da região de São João del Rei na borda austral do Cráton do São Francisco**, Brasil. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 50, n. 2, p. 123–145, 2020.

PASSCHIER, Cees W.; TROUW, Rudolph AJ. **Microtectonics**. Springer Science & Business Media, 2005.

PORTAL GEOLOGIA. **Mapa geológico do Brasil**. Disponível em:

http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/#col-form-download-tab. Acesso em: out. 2024.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. ***QGIS Geographic Information System****, versão 3.40.4*.

Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. Disponível em: https://qgis.org.

QUEVEDO, Vitório Capellari. **Análise petrográfica dos metassedimentos dos complexos supracrustais das regiões de São Gabriel, Santa Margarida do Sul e Vila Nova do Sul, Terreno São Gabriel, Cinturão Dom Feleiciano**. 2023.

RESENDE MADEIRA, Mariana de et al. Caracterização faciológica e evolução sedimentar da Formação Moeda (Supergrupo Minas) na porção noroeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Geologia USP. Série Científica**, v. 19, n. 3, p. 129-148, 2019.

RIBEIRO, Álvaro. et al. **A Orogênese Brasiliana no sudeste do Brasil: síntese dos domínios tectônicos afetados e evolução geodinâmica.** Geociências, São Paulo, v. 32, n. 2, p. 493–512, 2013.

RIBEIRO, A. A. **Estratigrafia e paleambientes nas sucessões metassedimentares**

Proterozóicas das Serras do Lenheiro e São José, São João Del-Rei, sul de Minas Gerais. 1997. 189 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

SILVA A.S., Pimentel E.C., Neves S.B., Colpaert H., Ramos O. 1978. **Carta**

Geológica do Brasil ao Milionésimo. Folha SE.23. Belo Horizonte, Brasília, DNPM-DGM.

SCHOBBENHAUS, Carlos; BRITO NEVES, Benjamim Bley de. A geologia do Brasil no contexto da Plataforma Sul-Americana. **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Brasília, CPRM**, v. 5325, 2003.

YARDLEY, B. W. D. **An Introduction to Metamorphic Petrology**. Harlow: Longman Earth Science Series, 1989. 248 p.

ANÁLISE DO USO DA TERRA E COBERTURA VEGETAL DA BACIA DO RIO SALOBRA - MS, BRASIL

1 Daires Eduardo Bento Lima Franco, 2 Lucy Ribeiro Ayach, 3 Kennedy Francis Roche
1 UFMS, e-mail: daires.franco@ufms.br; 2 UFMS-CPAQ, e-mail: lucy.ayach@ufms.br; 3 UFMS, e-mail: kennedy.roche@ufms.br

Palavras-chave: Uso da terra e cobertura vegetal; bacia hidrográfica; impactos ambientais.

Resumo

Este estudo tem como objetivo analisar o uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Salobra, localizada na região da Serra da Bodoquena, Mato Grosso do Sul, no ano de 2021, por meio da aplicação de geotecnologias. A área de estudo apresenta grande relevância ambiental para o estado de Mato Grosso do Sul, especialmente por estar inserida em ambiente cárstico associado à Serra da Bodoquena exercendo influência direta sobre a dinâmica hídrica do Pantanal. As características geológicas e geomorfológicas da região favorecem a existência de nascentes, rios de águas cristalinas e elevada biodiversidade, tornando o ambiente naturalmente vulnerável às alterações provocadas pelas ações antrópicas. Além disso, por integrar a Bacia do Alto Paraguai, os processos ambientais ocorridos na bacia do rio Salobra podem refletir diretamente na conservação dos ecossistemas pantaneiros. A pesquisa foi desenvolvida com base em abordagem qualitativa e quantitativa, utilizando imagens de satélite Landsat-8 e CBERS-4A, processadas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). O mapeamento do uso da terra foi realizado por meio de classificação não supervisionada, com validação da acurácia a partir do índice Kappa, obtendo valor de 0,75, considerado satisfatório. Os resultados indicaram a predominância de áreas florestais, que correspondem a 71,39% da área total da bacia, seguidas por pastagens (14,54%), culturas temporárias (9,72%), áreas descobertas (4,24%) e águas continentais (0,10%). Observou-se que a distribuição das classes está diretamente relacionada às características físicas do relevo e às atividades antrópicas desenvolvidas na região, como agropecuária, turismo e mineração. Destacam-se impactos ambientais associados à ausência de mata ciliar, presença de atividades minerárias próximas a cursos d'água e expansão de áreas agrícolas, especialmente em regiões de maior acessibilidade. Conclui-se que o uso de geotecnologias se mostrou eficiente para a análise espacial e o monitoramento ambiental da bacia hidrográfica, permitindo identificar padrões de uso da terra e áreas de maior vulnerabilidade ambiental. Os resultados obtidos podem subsidiar ações de planejamento e gestão ambiental, contribuindo para a conservação dos recursos naturais em uma área de elevada importância ecológica e inserida na transição entre os biomas Cerrado e Pantanal.

Introdução

Os estudos ambientais têm se consolidado como fundamentais para a compreensão das dinâmicas naturais e das transformações decorrentes da ação antrópica no espaço geográfico. A análise das formas de uso e ocupação da terra permite identificar padrões de organização da paisagem, bem como os impactos ambientais associados às atividades humanas, subsidiando ações de planejamento e gestão ambiental.

Nesse contexto, o uso das geotecnologias tem se destacado como uma importante ferramenta no monitoramento ambiental (Sousa, 2024). Técnicas como o sensoriamento remoto e o Sistema de Informação Geográfica (SIG) possibilitam a aquisição, processamento e análise de dados espaciais em diferentes escalas, permitindo a identificação de mudanças na cobertura vegetal e no uso da terra ao longo do tempo. O sensoriamento remoto baseia-se na análise da energia eletromagnética refletida, emitida ou retroespalhada pelos alvos terrestres, sendo captada por sensores instalados em plataformas aéreas e orbitais, o que viabiliza o estudo de grandes extensões territoriais com maior eficiência e precisão (Lorenzetti, 2015).

Essas ferramentas tornaram-se mais acessíveis e amplamente utilizadas em estudos ambientais, o desenvolvimento do sensoriamento remoto está historicamente associado à evolução da fotografia aérea e ao uso de tecnologias orbitais, especialmente a partir da segunda metade do século XX, com o lançamento de satélites voltados à observação da Terra (Florenzano, 2002; Jensen, 2009). Com o avanço tecnológico, houve uma ampliação significativa da disponibilidade de dados, permitindo aplicações em diversas áreas do conhecimento.

O sensoriamento remoto envolve duas etapas fundamentais: a aquisição de dados, relacionada à captação da radiação eletromagnética pelos sensores, e a utilização desses dados em diferentes aplicações, como estudos geográficos, ambientais e agronômicos (Rosa, 2005). A qualidade das imagens obtidas está associada a diferentes tipos de resolução, como espacial, espectral, radiométrica e temporal, que determinam o nível de detalhamento e a capacidade de interpretação dos dados (Jensen, 2009).

A utilização dessas técnicas é especialmente relevante em áreas de difícil acesso e com grande diversidade de usos da terra, onde o levantamento de informações em campo pode ser limitado. Nessas situações, o sensoriamento remoto e o geoprocessamento permitem uma análise abrangente da paisagem, possibilitando a identificação de padrões espaciais e dinâmicas ambientais (Santos; Silva, 2025).

Nesse sentido, o emprego das geotecnologias em estudos de bacias hidrográficas tem se tornado essencial para o diagnóstico ambiental (Costa; Quintanilha, 2024). O uso integrado de sensoriamento remoto e geoprocessamento possibilita a análise do uso da terra e da cobertura vegetal, contribuindo para o planejamento e a gestão dos recursos naturais (Melo; Sales; Oliveira, 2011). Além disso, os Sistemas de Informação Geográfica permitem a organização e análise de dados georreferenciados, auxiliando na compreensão da dinâmica ambiental e na previsão de riscos associados aos componentes naturais (Pires, 1995).

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Salobra (Figura 01), localizada na região da Serra da Bodoquena, no estado de Mato Grosso do Sul. A bacia abrange áreas rurais dos municípios de Bodoquena, Bonito, Miranda e Porto Murtinho, exercendo papel relevante na dinâmica hídrica do Pantanal, além de apresentar significativa importância ecológica devido à sua localização em uma zona de transição entre biomas (Franco; Ayach, 2025).

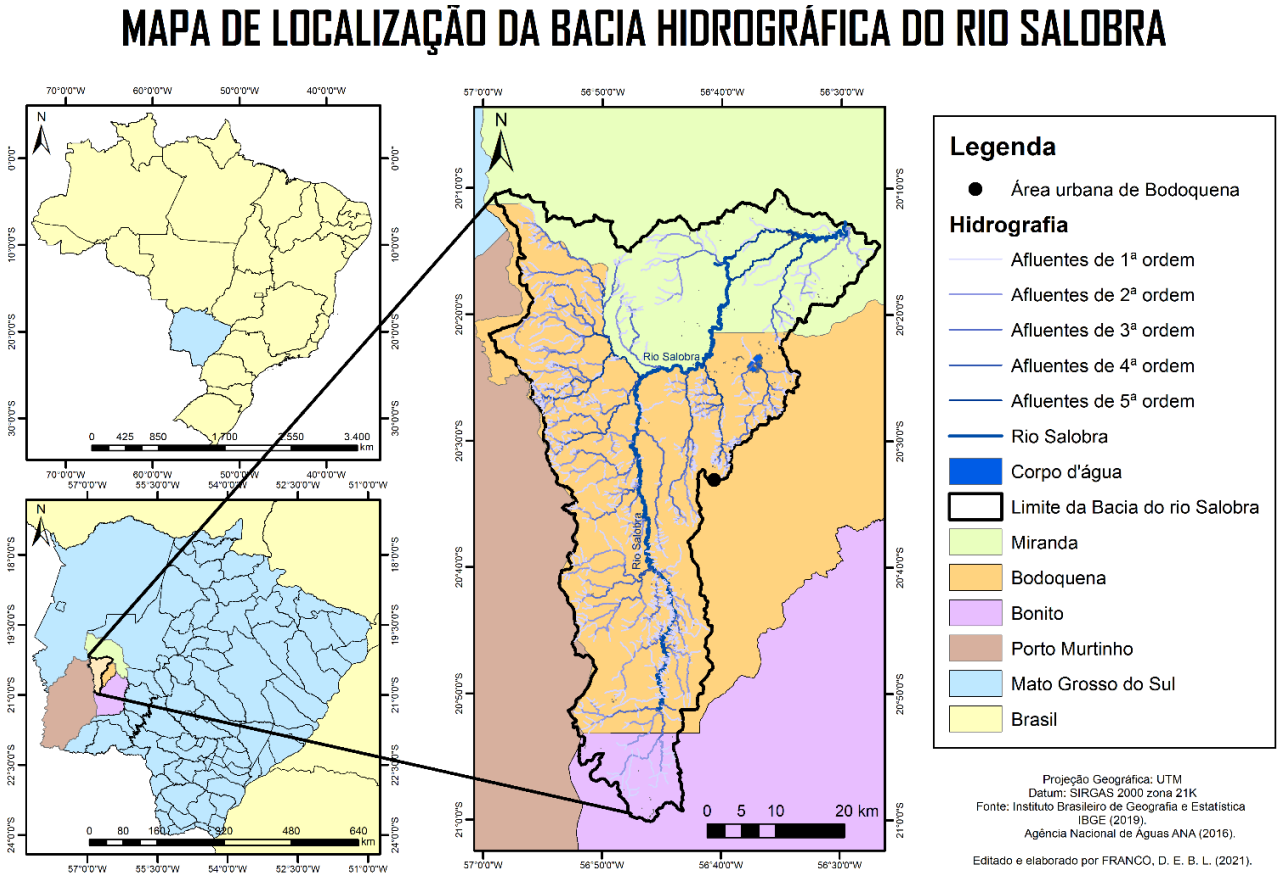


Figura 01: Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Salobra.
Fonte: o próprio autor (2021)

Do ponto de vista histórico e ambiental, a região tem passado por intensas transformações decorrentes do uso antrópico. O uso de geotecnologias apresenta-se como um importante instrumento para a compreensão da dinâmica do uso e cobertura da terra, permitindo identificar conflitos de uso e possíveis impactos ambientais. Além disso, a integração entre dados obtidos por sensoriamento remoto e observações em campo contribui para uma análise mais precisa da paisagem, ampliando a capacidade de interpretação das transformações ocorridas na bacia.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo analisar o uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Salobra (MS), no ano de 2021, por meio da aplicação de geotecnologias. Para isso, busca-se mapear a bacia hidrográfica e suas classes de uso e cobertura da terra; analisar os dados obtidos a partir do mapeamento; realizar visitas a campo para identificação e interpretação dos elementos da paisagem, comparando-os com os resultados obtidos por sensoriamento remoto; identificar, por meio de imagens de satélite, áreas de uso de recursos minerais, com destaque para a extração de calcário; e, por fim, reconhecer possíveis impactos ambientais, especialmente em áreas de interesse turístico.

Material e Métodos

A pesquisa foi desenvolvida a partir de análise qualitativa para a descrição e interpretação dos dados, e análise quantitativa com os resultados dos mapeamentos e amostras de coleta de água, complementando-se para atingir os objetivos propostos.

Mapeamento do uso da terra na bacia hidrográfica

Foram utilizadas imagens de satélite TM/Landsat-8 – Órbita/Ponto 226-074 e Bandas 4, 5 e 6 do dia 19/05/2021 (mapeamento) e CBERS-4A – Órbita/Ponto 216-139 e Bandas 1, 2, 3 e 4 do dia 01/05/2021 (acurácia), selecionadas com base na disponibilidade temporal e na qualidade radiométrica, priorizando cenas com baixa cobertura de nuvens.

As análises espaciais foram realizadas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), nos softwares Spring (versão 5.5.6) e ArcGIS (versão 10.5) permitindo a integração e sobreposição de diferentes camadas temáticas, como uso da terra, rede de drenagem e pontos de coleta.

O processamento das imagens envolveu as seguintes etapas: (1) correção geométrica e organização das cenas; (2) composição colorida das bandas espectrais; (3) recorte da área de estudo com base no limite da bacia hidrográfica; (4) classificação não-supervisionada do uso e cobertura da terra.

Dentro do *software* Spring foram importadas as imagens das bandas 4, 5 e 6. Realizou-se o contraste das bandas e a composição colorida. Após alguns testes, foi definido o método de classificação, sendo este não-supervisionado. Para isso, foi utilizado a imagem da composição colorida denominada (sintética) para o processo de segmentação feita automaticamente pelo *software*. Para a área de estudo foi usado a similaridade igual a 8 e a área do pixel como 20. Após a segmentação foi criado um contexto para a extração de atributos das regiões e na sequência a classificação. Na classificação utilizou-se o método Isoseg, com limiar de aceitação de 99%.

Após a classificação utilizou-se informações contidas no modelo de dados temático denominado (mapeamento) com as classes temáticas pré-definidas (área florestal, área descoberta, pastagens + cultura temporária e águas continentais). Utilizando a opção "mapeamento de classes para imagem temática", foi mapeado cada um dos 31 temas obtidos, para a classe temática correspondente. Para verificar e comparar o tema com a classe, foi utilizada as imagens do satélite Landsat-8. Após a definição dos 31 temas, o software executou e gerou o mapa temático no formato *raster*. Após o processamento o arquivo foi exportado do Spring em formato GeoTIFF, para ser finalizado no software ArcGIS.

Para verificar a acurácia do mapa foi utilizado o índice Kappa. Foi estabelecido o número de pontos a serem amostrados (519 pontos) para a bacia hidrográfica. Esses pontos foram distribuídos aleatoriamente de acordo com a área de cada uma das classes temáticas.

Após a distribuição dos pontos, foi aberto a tabela de atributos dos pontos para verificar se o ponto classificado estava correto ou não, e qual a classe correta. Para tal, foi utilizado a imagem do satélite CBERS-4A com resolução espacial de 2 m na pancromática. A data da imagem é de 01 de maio de 2021. Após a verificação de cada um dos pontos, foi salvo as edições na tabela de atributos. No próprio ArcGIS foi executado a função "matriz de confusão" gerando o índice Kappa (Quadro 01).

Classe	Área florestal	Pastagens	Cultura temporária	Área descoberta	Águas continentais	Total	U Acurácia	Kappa
Área florestal	**353**	21	3	2	1	380	0,928947	0
Pastagens	3	**66**	5	0	0	73	0,904110	0
Cultura temporária	2	1	**16**	0	0	38	0,421053	0
Área descoberta	2	1	0	**20**	0	23	0,869565	0
Águas continentais	0	0	0	0	**5**	5	1	0
Total	360	107	24	22	6	**519**	0	0
P Acurácia	0,980556	0,616822	0,666667	0,909091	0,833333	0	**0,886320**	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	0	**0,751659**

Quadro 01 – Matriz de confusão para obtenção do índice Kappa.
Fonte: o próprio autor (2021)

Trabalho de Campo

O trabalho de campo consistiu na observação direta das diferentes formas de uso e cobertura da terra presentes na bacia hidrográfica, bem como na identificação de impactos ambientais associados às atividades antrópicas. Foram realizados registros fotográficos sistemáticos com o objetivo de documentar as condições da paisagem, incluindo áreas de degradação, uso agropecuário, exploração mineral e alterações na cobertura vegetal.

A integração entre os dados obtidos em campo e as informações derivadas do sensoriamento remoto possibilitou a validação do mapeamento realizado, além de contribuir para a interpretação dos padrões espaciais identificados. Essa abordagem permitiu reconhecer áreas críticas de degradação ambiental, analisar a correspondência entre os usos observados e as classes mapeadas, bem como avaliar a vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica.

Resultados e Discussão

Análise do uso da terra e cobertura vegetal da bacia hidrográfica

As classes de uso da terra e cobertura vegetal da bacia hidrográfica do rio Salobra serão apresentadas no mapa da figura 02. Para um melhor detalhamento da área, o Quadro 02 apresentarão a área das classes em km^2 e em percentual.

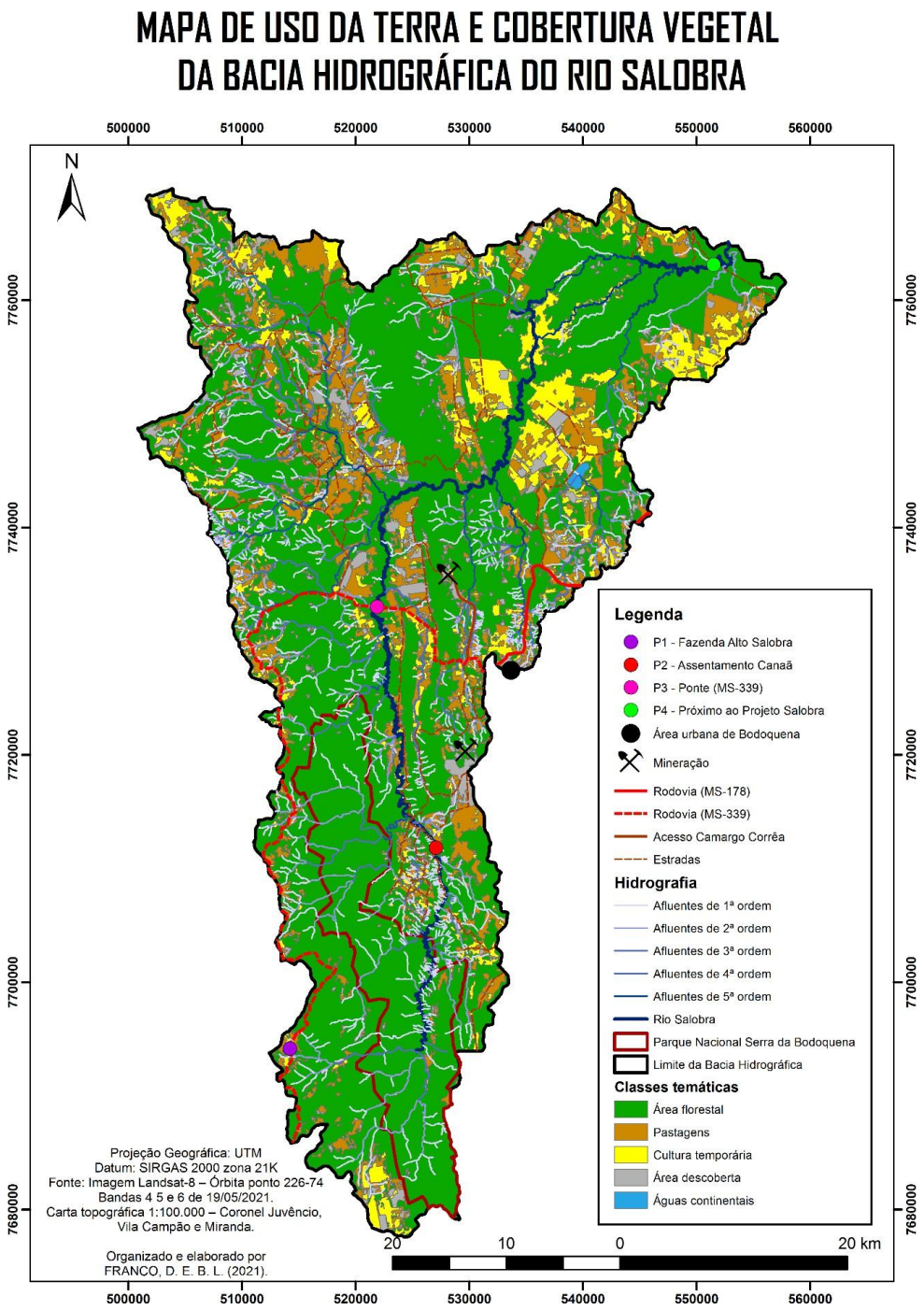


Figura 02: Uso da terra e cobertura vegetal da bacia hidrográfica do rio Salobra (Imagem Landsat-8 de 19/05/2021).
Fonte: o próprio autor (2021)

Classe temática	Área (km2)	Área (%)
Área florestal	1.677,24	71,39
Pastagens	341,74	14,54
Cultura temporária	228,40	9,72
Área descoberta	99,72	4,24
Águas continentais	2,35	0,10
Total	2.349,45	100,00

Quadro 02: Área das classes temáticas da bacia hidrográfica.
Fonte: o próprio autor (2021)

A bacia hidrográfica apresenta grandes áreas florestais, com (71,39%) da área total da bacia. Este fato não se dá pela preservação ocorrida, mas pelas características físicas (morrarias, serras e escarpas) que dificultam a exploração extensiva, principalmente na área do Parque Nacional da Serra da Bodoquena.

A poucos quilômetros da cidade de Bodoquena (que está no divisor de águas da bacia hidrográfica), encontra-se duas áreas de mineração. A primeira é a empresa Camargo Corrêa, que está mais ao norte da área urbana. E a segunda é a empresa Horii, ao sul da área urbana.

As mineradoras fazem extração de sílica e calcário, componentes para a fabricação de cimento. Próximo aos conjuntos de edificações industriais, encontra-se uma área de extração mineral nas rochas da formação Bocaina. Observa-se que as duas mineradoras estão próximas à canais tributários do rio Salobra (Figura 04 e 05), ou seja, seu uso pode interferir no equilíbrio do sistema ambiental.



Figura 04: Empresa de mineração Camargo Corrêa na bacia hidrográfica do córrego Cascavel. Mineradoras
Fonte: CBERS-4A – resolução espacial de 8 m (01/05/2021)

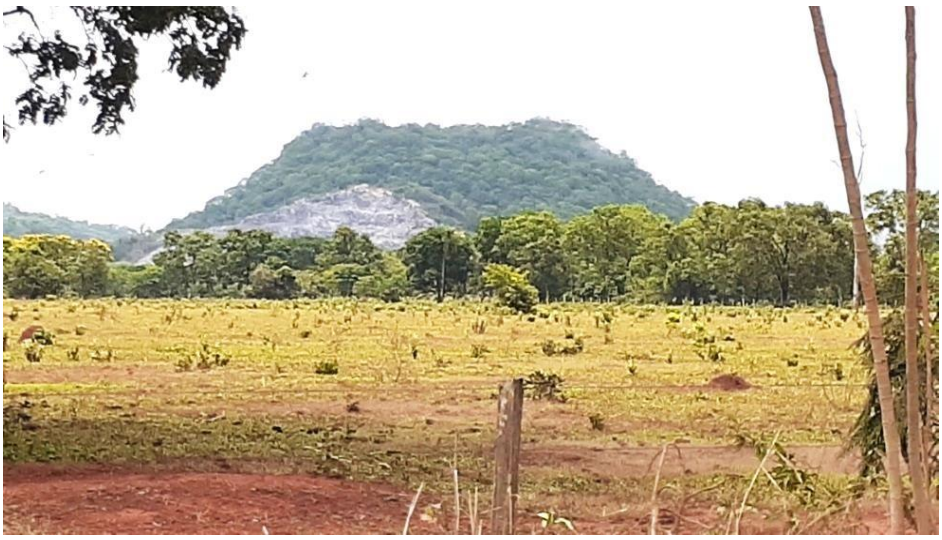


Figura 05: Lavra da mineradora Horii próximo as nascentes da bacia hidrográfica do córrego Campina.
Fonte: o próprio autor (2021)

A maior parte das áreas de pastagem encontra-se em áreas com topografia as mais planas, o que favorece o seu uso. No entanto, dentro do Assentamento Canaã existem algumas áreas descampadas nos morros, onde se observa a presença de gado bovino (Figura 06). A pastagem representa a segunda maior classe com (14,54%) de área.

Nas proximidades do limite da bacia hidrográfica à leste na rodovia (MS-339), que dá acesso à Morraria do Sul, é observado a presença de áreas abertas no planalto (borda da bacia). Essas áreas se dividem entre pastagens e cultura temporária de grãos e estão à beira da estrada sem delimitação por cercas. Isso faz com que o gado bovino circule livremente próximo à rodovia não pavimentada.



Figura 06: Morro com áreas de pastagens e criação de gado bovino no Assentamento Canaã.
Fonte: o próprio autor (2021)

No extremo sul da bacia hidrográfica, encontram-se áreas destinadas às culturas temporárias, ao longo de toda a bacia, também são identificadas áreas descobertas (Figura 07), caracterizadas como solo exposto, especialmente no período de preparo do terreno para o plantio. As classes de cultura temporária e solo exposto correspondem a 9,72% e 4,24% da área total, respectivamente.

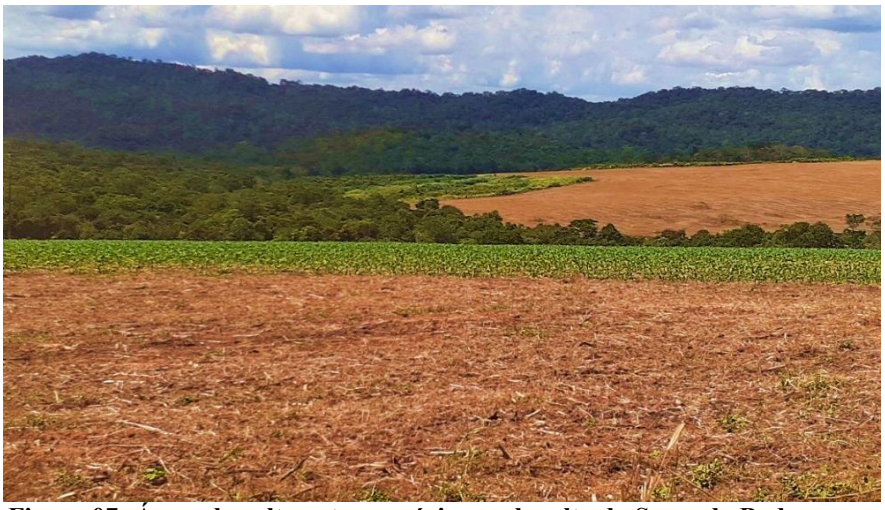


Figura 07: Áreas de cultura temporária no planalto da Serra da Bodoquena.
Fonte: o próprio autor (2021)

Já no médio e baixo curso do rio, na porção norte da bacia hidrográfica, observa-se uma maior concentração de estradas que dão acesso às fazendas e assentamentos dos municípios de Bodoquena e Miranda. Esse fator contribui para a predominância de extensas áreas de pastagens. Nota-se, ainda, que diversos canais tributários intermitentes atravessam essas áreas sem a presença de mata ciliar.

Na porção nordeste da bacia hidrográfica, próxima a uma lagoa natural que sofreu alterações por ação antrópica, identifica-se uma área de cultura temporária irrigada. Nesse local, as águas provenientes do rio Salobra e da própria lagoa são utilizadas para fins agrícolas.

Na região central da bacia hidrográfica, destaca-se uma faixa contínua de vegetação florestal orientada no sentido norte-sul. Essa configuração está associada à presença de morrarias que atravessam a bacia, influenciando a dinâmica geomorfológica. O rio Salobra percorre essa área, promovendo o desgaste das rochas e o transporte de sedimentos em direção ao baixo curso.

Por fim, no baixo curso, o rio Salobra apresenta um padrão de escoamento caracterizado pela formação de um leque aluvial. Esse fenômeno ocorre em áreas de baixa declividade, como no Pantanal, a exemplo do rio Taquari. Em razão das condições de relevo plano e da suscetibilidade à saturação do solo em períodos chuvosos, a região apresenta relativa preservação da cobertura florestal (figura 08), embora em alguns trechos sejam observadas áreas abertas.



Figura 08: Rio Salobra próximo à foz (Comunidade Salobra).
Fonte: o próprio autor (2021)

As áreas descobertas, que estão distribuídas em toda a área, em sua maioria são de solo que está sendo preparado para semeadura, ou solo exposto por consequência de pastagens secas em período de estiagem.

Considerações Finais

Constatou-se, a partir dos resultados da pesquisa, que a bacia hidrográfica do rio Salobra possui uma rica biodiversidade e geodiversidade sendo notável a importância ambiental e econômica, considerando suas características geográficas e localização na transição dos biomas Cerrado com o Pantanal.

Estudos realizados anteriormente revelaram que a bacia possui fragilidade ambiental, isso é comprovado a campo observando os impactos de: construções em áreas de APPs; áreas de pastagem próximo ao canal principal e em topo de morros; avanço da agricultura no planalto da Serra da Bodoquena e ausência de mata ciliar em diversos trechos do rio Salobra.

A presença do Parque Nacional da Serra da Bodoquena e do Pantanal é importante para a preservação da biodiversidade encontradas em ecossistemas únicos. Portanto, vale ressaltar que um canal fluvial depende de seus tributários para sua alimentação. Sendo assim, os eventos que ocorrem nas nascentes influenciam diretamente as águas do corpo hídrico à jusante, considerando que Bacia do Alto Paraguai drena as águas pantaneiras. Considerada a maior área úmida do mundo, o Pantanal possui características peculiares que tornam o ecossistema frágil e indissociável da dinâmica regional, notadamente os efeitos de borda. Neste caso específico, a interferência ambiental na bacia hidrográfica do rio Salobra pode acarretar alterações no bioma Pantanal.

O avanço acelerado da agricultura, nos alerta sobre o uso da terra sem atender à legislação do Código Florestal e os desdobramentos que podem ocorrer a longo prazo. Além disso, é necessário atentar para as atividades econômicas contrastantes (agricultura, turismo e mineração) em área cárstica e vulnerável.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) pelo suporte institucional e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido para a realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

COSTA, J. D. M. da; QUINTANILHA, J. A. Uso das geotecnologias na estimativa de biomassa e carbono florestal: uma revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 17, n. 2, p. 1127-1146, 2024. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/258166/45935. Acesso em: 3 maio 2026.

FLORENZANO, T. G. Tecnologia espacial no Brasil. In: FLORENZANO, T. G. *Imagens de satélite para estudos ambientais*. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. p. 23-32.

FRANCO, D. E. B. L.; AYACH, L. R. Análise da qualidade da água superficial do Rio Salobra – Bodoquena-MS, como subsídio para uma gestão ambiental integrada. In: LEITE, E. F. (org.). *Olhares do PPGGeo/CPAQ ao espaço, ensino e dinâmica socioambiental*. Campo Grande, MS: Ed. UFMS, 2025. p. 64-93.

JENSEN, J. R. *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

LORENZETTI, J. A. O conceito de sensoriamento remoto. In: LORENZETTI, J. A. *Princípios físicos de sensoriamento remoto*. São Paulo: Blucher, 2015. p. 15-23.

MELO, E. T.; SALES, M. C. L.; OLIVEIRA, J. G. B. de. Aplicação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para análise da degradação ambiental da microbacia hidrográfica do riacho dos Cavalos, Crateús-CE. *RA'E GA – O Espaço Geográfico em Análise*, Curitiba, v. 23, p. 520-533, 2011. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/raega/article/viewFile/24919/16717. Acesso em: 3 maio 2026.

PIRES, J. S. R. *Análise ambiental voltada ao planejamento e gerenciamento do ambiente rural: abordagem metodológica aplicada ao município de Luiz Antônio-SP*. 1995. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995. Disponível em: http://www.lapa.ufscar.br/pdf/tese_jose_salatiel_r_pires_1995.pdf. Acesso em: 3 maio 2026.

ROSA, R. Geotecnologias na geografia aplicada. *Revista do Departamento de Geografia*, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 81-90, 2005. Disponível em: https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47288/51024. Acesso em: 3 maio 2026.

SANTOS, M. L. F.; SILVA, J. B. Contribuição do sensoriamento remoto para o estudo dos manguezais: uma revisão bibliométrica (2019–2024). *Geoconexões*, Natal, v. 3, n. 1, p. 1-19, 2025. Disponível em: https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/geoconexoes/article/view/18706/4635. Acesso em: 3 maio 2026.

SOUSA, D. R. de. *Inventário florístico e sensoriamento remoto de reserva legal em fragmentos de cerrado no sul do Piauí*. 2024. 53 f. Monografia (Graduação em Ciências Biológicas Bacharelado) – Universidade Estadual do Maranhão, Campus Bacabal, Bacabal, 2024.

DINÂMICA MORFOMÉTRICA E INFLUÊNCIA AMBIENTAL NO RIO ANDRADA: UMA ANÁLISE EM SIG

1 David Borovicz Carvalho da Silva de Jesus, 2 Pedro Rondon Werneck, 3 Analice Timoteo de Araujo, 4 Humberto Rodrigues Francisco, 5 Altevir Signor, 6 Aldi Feiden

1 Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE; Campus Toledo, e-mail: david.engaqui@gmail.com;
2 Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE; Campus Toledo, e-mail: prondonwerneck@gmail.com
3 Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE; Campus Toledo, e-mail: analice.t.araujo@gmail.com;
4 Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS; Campus Laranjeiras do Sul e-mail: humberto.francisco@uffs.edu.br;
5 Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE – Campos Toledo, e-mail:altevirsignor@gmail.com;
6 Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE – Campos Toledo, e-mail:aldifeiden@gmail.com.

Palavras-chave: Geotecnologias; Gestão ambiental; Morfometria; Piscicultura.

Resumo

A bacia hidrográfica constitui a unidade territorial mais adequada para o planejamento e a gestão integrada dos recursos hídricos, conforme preconizado pela Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997. Nesse contexto, os Sistemas de Informação Geográfica destacam-se como ferramentas fundamentais para o diagnóstico e a gestão ambiental. O objetivo do estudo foi caracterizar, por meio de análises geométricas e fisiográficas, a microbacia do rio Andrada, no município de Cascavel–PR, bem como identificar e quantificar os viveiros escavados destinados à piscicultura. A delimitação da microbacia foi realizada a partir de Modelo Digital de Elevação processado no software QGIS®. Os viveiros foram identificados por interpretação visual em imagens de alta resolução do Google Earth®. Foram calculados índices morfométricos, analisados o uso e ocupação do solo (MapBiomas), a declividade, a altitude e os tipos de solo (EMBRAPA). A estimativa do aporte residual de nitrogênio e fósforo seguiu o modelo proposto por Coldebella et al. (2020). Os resultados evidenciaram que a microbacia apresenta área de 1556 km², forma alongada (fator de forma de 0,36; coeficiente de compacidade de 1,74), densidade de drenagem de 0,88 km/km² e relevo predominantemente plano a suavemente ondulado. Foram registrados 322 viveiros escavados, com predominância de estruturas de pequeno porte. Os viveiros de menor porte, em função de sua maior quantidade, apresentam contribuição mais expressiva nos aportes totais de nitrogênio e fósforo. Conclui-se que a microbacia do rio Andrada apresenta aptidão ambiental para o desenvolvimento sustentável da piscicultura, e as geotecnologias mostraram-se essenciais para o planejamento territorial e a expansão sustentável da atividade aquícola.

Introdução

Bacia Hidrográfica é a área de drenagem de um rio principal e seus afluentes. Schiavetti et al,. (2002) explica que bacia hidrográfica é a unidade mais adequada para estudar e gerenciar a água, os sedimentos e os nutrientes, pois integra não apenas aspectos hidrológicos, mas também fatores ambientais, como uso do solo e características biofísicas, sendo considerada uma unidade prática semelhante a um ecossistema para planejamento e conservação dos recursos naturais.

A Política Nacional de Recursos Hídricos - Lei nº 9.433 (Brasil, 1997), propõe uma gestão integrada baseada na bacia hidrográfica e no conceito de ecossistema, considerando as interações entre fatores bióticos e abióticos na análise dos recursos hídricos. Nesse contexto, o Paraná, por meio da Lei Estadual nº 12.726 (Paraná, 1999), estabelece que a outorga de uso da água pode ser suspensa ou limitada pelo poder público em situações como escassez, necessidade de atender usos prioritários ou risco de degradação ambiental, o que permite o controle e a proteção dos recursos hídricos em consonância com os princípios da legislação federal.

Uma das ferramentas fundamentais para realizar o diagnóstico, o planejamento e a gestão ambiental de bacias hidrográficas são os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), pois permitem a integração e a análise conjunta de múltiplos atributos ambientais (Alves et al., 2021). Essa tecnologia auxilia na tomada de decisões, podendo ser um facilitador de informações para a seleção de sítios destinados à piscicultura em tanques escavados, ao integrar dados espaciais sobre solo, qualidade da água e aspectos socioeconômicos, identificando áreas adequadas e restrições geográficas e contribuindo para práticas mais sustentáveis e rentáveis (Dapieve et al., 2023).

Nesse contexto, o uso de ferramentas geotecnológicas torna-se essencial para a avaliação do potencial de desenvolvimento aquícola. O presente estudo teve como objetivo caracterizar, por meio de análises geométricas e fisiográficas, a microbacia do rio Andrada, localizada no município de Cascavel–PR, integrante da Bacia Hidrográfica do rio Iguaçu, na região oeste do Paraná. Além disso, buscou-se identificar e quantificar, com o auxílio dessas ferramentas, os viveiros escavados destinados à piscicultura presentes na área de estudo.

Material e Métodos

A área de estudo compreende a microbacia hidrográfica do rio Andrada, que tem sua nascente localizada no município de Cascavel/PR. O curso do rio se desenvolve no sentido geral leste-oeste, atravessando diferentes unidades de paisagem até atingir sua foz na margem esquerda do Rio Iguaçu, no município de Capitão Leônidas Marques/PR. Como afluente direto de um

dos principais rios da região Sul do Brasil, o Andrada desempenha papel relevante na conectividade hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu, no contexto do baixo Iguaçu., caracterizado por elevada relevância ambiental e energética (SEDEST, 2012). A delimitação da microbacia foi realizada a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE), com resolução espacial de 30 metros, disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os dados foram processados no software QGIS® versão 3.22.14 – Białowieża (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2025), com aplicação de rotinas para correção de inconsistências topográficas e uso de algoritmos hidrológicos para definição automática da drenagem e do limite da bacia com base no exultório principal, previamente identificado com apoio do *OpenStreetMap*. Posteriormente, os dados *raster* foram convertidos para formato vetorial, permitindo sua análise espacial.

A identificação dos viveiros de piscicultura foi realizada por interpretação visual em imagens de alta resolução no software Google Earth®, possibilitando a delimitação e mensuração das estruturas presentes na microbacia. As informações de uso e ocupação do solo foram obtidas a partir da plataforma MapBiomas (MAPBIOMAS, 2025), em formato *raster (GeoTIFF)*, com resolução espacial de 30 metros e escala de 1:100.000, permitindo a caracterização da dinâmica da paisagem e a identificação de diferentes classes de cobertura da terra, conforme descrito por Neves et al. (2020).

A caracterização morfométricas da microbacia foi conduzida em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), a partir do processamento de dados vetoriais no QGIS®, utilizando a calculadora de atributos associada a arquivos *shapefile*. Foram extraídas variáveis geométricas e topográficas, como área, perímetro, comprimento dos canais e amplitude altimétrica, a partir das quais foram calculados índices morfométricos amplamente empregados em estudos hidrológicos, incluindo coeficiente de compacidade, fator de forma, índice de circularidade, densidade de drenagem, tempo de concentração, índice de sinuosidade, razão de alongamento, razão de relevo relativo, coeficiente de manutenção e índice de rugosidade (tabela 1).

ÍNDICE	FÓRMULA	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIA
Kc – Coeficiente de compacidade	$Kc = 0{,}28 \times \left(\frac{P}{\sqrt{A}}\right)$	P: perímetro da bacia (m); A: área da bacia (m²)	(Dornellas et al., 2020)
Kf – Fator de Forma	$F = \frac{A}{E^2}$	A: área da bacia (m²); E: comprimento do eixo da bacia (m)	(Silva et al., 2016)
Ic – Índice de Circularidade	$Ic = \frac{12{,}57 \times A}{P^2}$	A: área da bacia (m²); P: perímetro da bacia (m)	(Tonello et al., 2006)
Dd – Densidade de Drenagem	$Dd = \frac{Lt}{A/1000}$	Lt: comprimento da rede de drenagem (km); A: área da bacia (km²)	(Souza et al., 2018)
Tc – Tempo de Concentração	$Tc = 57 \times \left(\frac{L/1000^3}{H}\right)^{0{,}385}$	L: comprimento do talvegue principal (km); H: desnível (m)	(Dornellas et al., 2020)
Is – Índice de Sinuosidade	$Is = \frac{100 \times (L - Lr)}{L}$	L: comprimento do rio principal (m); Lr: comprimento do talvegue do rio principal (m)	(Schumm, 1963)
Er – Razão do Alongamento	$Er = 1{,}128 \times \frac{\sqrt{A}}{E}$	A: área da bacia (m²); E: comprimento do eixo da bacia (m)	(Miller, 1953)
Rv – Relevo Relativo	$Rv = \frac{H}{P}$	P: perímetro da bacia (m); H: amplitude altimétrica (m)	(Schumm, 1956)

Tabela 1: Índices morfométricos, fórmulas, descrição e valores de referências utilizados na microbacia hidrográfica do Rio Andrada, município de Cascavel-PR, inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu.
Fonte: Adaptado de Werneck et al. (2023).

As análises de relevo foram complementadas com a elaboração de mapas de declividade e altitude a partir de dados do projeto *Topodata*, disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2023). Os dados foram submetidos a procedimentos de mosaico, reprojeção para o sistema SIRGAS 2000, projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), fuso 22 Sul, e recorte espacial, sendo posteriormente classificados conforme os critérios da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2021). De forma complementar, os tipos de solo foram incorporados à análise a partir de dados oficiais da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2021), integrados ao ambiente SIG após recorte espacial da área de estudo.

Por fim, a estimativa do aporte residual de nitrogênio total (NT) e fósforo total (PT), bem como dos volumes de efluentes associados à piscicultura, foi realizada com base no modelo metodológico (tabela 2) proposto por Coldebella et al. (2020), considerando como variáveis principais a área de cultivo e a biomassa produzida. Essa abordagem permitiu integrar dados produtivos e ambientais, contribuindo para a compreensão dos potenciais impactos sobre a microbacia do rio Andrada.

Classes	Valores de referência de criação			
	Criação		Despesca	
	Nitrogênio (Kg/ha)	Fósforo (Kg/ha)	Nitrogênio (Kg/ha)	Fósforo (Kg/ha)
Classe I	2.047,70	261,91	54,59	16047
Classe II	1.951,05	197,30	120,49	26,11
Classe III	2.055,85	260,99	81,56	12,18

Tabela 2: Classes de viveiros e os valores de referência utilizados para os cálculos de Nitrogênio total e Fósforo total aportados durante as fases de criação e despesca da piscicultura
Fonte: Adaptado de Coldebella et al (2020)

Resultados e Discussão

A microbacia hidrográfica do rio Andrada, Cascavel - PR apresenta uma área de 1556 km², perímetro de 117,3 km e amplitude altimétrica de 298 m. A análise do fator de forma (0,36) aponta para uma bacia de configuração alongada, uma vez que valores próximos a 1 estão associados a formas mais compactas. (Silva et al., 2016). O coeficiente de compacidade de 1,74, ao se distanciar da unidade, evidencia a irregularidade do perímetro em relação à área drenada. O índice de circularidade, com valor de 0,32, corrobora essa interpretação, indicando baixa similaridade com um círculo.

De forma integrada, esses parâmetros caracterizam a bacia como alongada ou irregularmente alongada, o que implica menor tendência à concentração rápida do escoamento superficial e reduzida suscetibilidade a enchentes torrenciais, fornecendo informações essenciais para o planejamento hidrológico e a gestão de eventos extremos (Peruzzo et al., 2022; Trajano et al., 2012; Villela et al., 1975). A bacia do rio Andrada apresentou densidade de drenagem de 0,88 km/km², caracterizando-se como uma bacia de desenvolvimento intermediário da rede de drenagem, conforme a classificação proposta por Villela e Mattos (1975). Segundo esses autores, valores próximos a 0,5 km/km² indicam drenagem pouco expressiva, enquanto valores próximos a 3,5 km/km² refletem redes de drenagem densas. A densidade de drenagem é resultado da interação entre fatores climáticos e pedológicos, sendo geralmente mais elevada em regiões úmidas e reduzida em áreas com solos profundos e elevada capacidade de infiltração, que favorecem o armazenamento e a percolação da água no solo (Souza et al., 2023).

A sinuosidade de 57,98% (0,5798) evidencia que o rio principal apresenta padrão meândrico acentuado. Isso significa que o canal se desenvolve com numerosas curvaturas, resultando em comprimento consideravelmente superior à distância retilínea entre a nascente e a foz. Tal conformação está associada a baixa declividade do terreno, redução na velocidade do fluxo e aumento do tempo de deslocamento da água ao longo do canal. Rios com esse comportamento geralmente ocorrem em superfícies topográficas suavizadas, onde o transporte de sedimentos é acompanhado por significativa deposição (Negri et al., 2023). A razão de alongamento (Re = 0,68) caracteriza a bacia como de forma intermediária, com leve tendência ao alongamento. Esse valor indica resposta hidrológica menos concentrada, com maior tempo de concentração e menor probabilidade de ocorrência de picos de vazão abruptos. Assim, a morfologia da bacia contribui para reduzir o risco de inundações rápidas, posicionando-a entre os padrões circulares e fortemente alongados (Araujo et al., 2025; Dubey, 2020; Soni, 2017).

A microbacia do rio Andrada apresenta relevo predominantemente plano a suavemente ondulado, conforme demonstrados pela Figura 1a, com declividades inferiores a 10%, condição que favorece a mecanização agrícola e reduz o risco de erosão acentuada em relação a áreas montanhosas. Lewandowski et al. (2024), explica que a declividade do terreno influencia significativamente a construção de viveiros aquícolas, pois áreas de declive suave favorecem a estabilidade estrutural, reduzem riscos de erosão e facilitam a modelagem do sistema de contenção e drenagem.

A hipsometria da microbacia do rio Andrada, apresentado pela Figura 1b evidenciou amplitude altimétrica entre 200 e 900 m. Observou-se predominância da classe de 600 a 700 m, que totaliza 40.980 ha e representa 29,20% da área total da bacia hidrográfica. Com base no relatório ambiental apresentado pela Agathon Participações Ltda., 2015, o embasamento geológico condiciona, em grande medida, a fisiografia das drenagens que compõem uma bacia hidrográfica. O rio Andrada e seus afluentes, assim como os demais cursos d'água da região, encontram-se inseridos em terrenos com acentuadas variações altimétricas, o que explica as elevadas declividades observadas e, consequentemente, as altas velocidades de escoamento em determinados trechos, além de intensificar os processos de lixiviação do solo.

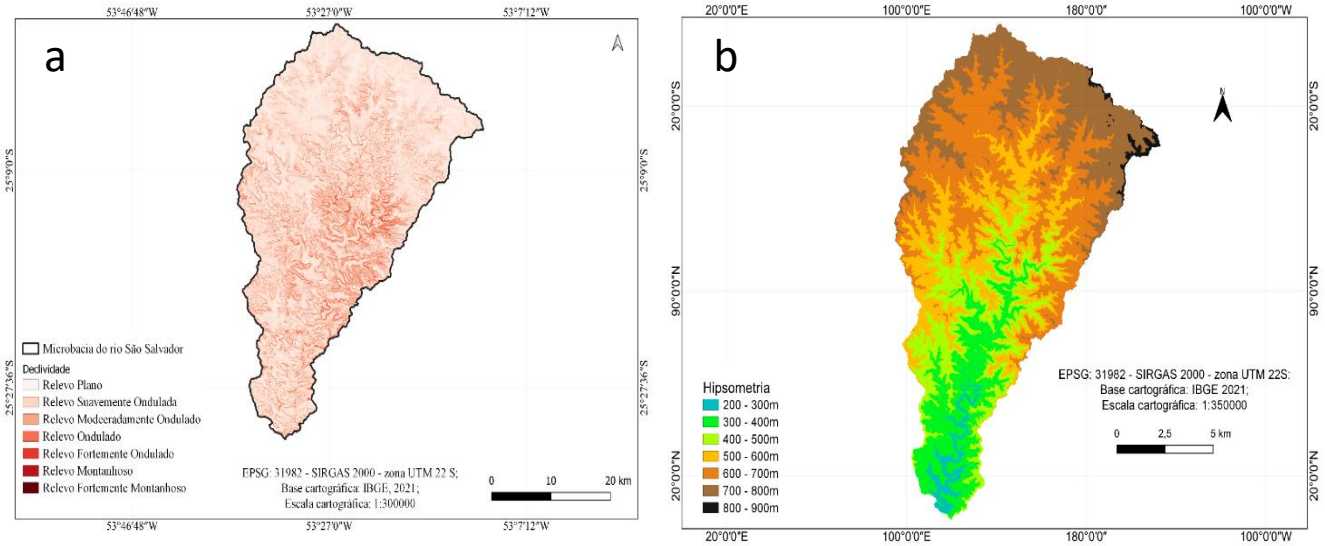


Figura 1: (a) Mapa de declividade da microbacia hidrográfica do Rio Andrada, município de Cascavel-PR, inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu, (b) Mapa altimétrico da microbacia hidrográfica do Rio Andrada, município de Cascavel-PR, inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu.
Fonte: Elaboradas pelos autores, 2026.

Conforme ilustrado na Figura 2a, a microbacia do rio Andrada apresenta predomínio de atividades agrícolas. A lavoura temporária constitui a classe mais expressiva, com 49.152 ha (31,58% da área total). Em seguida, destacam-se as formações florestais, que ocupam 43.729 ha (28,10%). As pastagens abrangem 30.491 ha (19,56%), enquanto o mosaico de usos representa 23.476 ha (15,08%). A silvicultura possui menor participação, com 3.986 ha, equivalente a 2,5% da área da bacia. Segundo estudos realizados por Dias e Campos (2020), com o fim da exploração madeireira no final da década de 1970, iniciou-se a industrialização no município, impulsionando atividades como a produção de grãos, a agropecuária e a prestação de serviços. Nesse contexto, verifica-se que as outorgas vigentes na região do Baixo Iguaçu estão diretamente relacionadas à irrigação e à dessedentação animal, corroborando os resultados referentes ao uso e ocupação do solo na microbacia analisada (Walm, 2022).

A área da microbacia do Rio Andrada apresentou 4 tipos de solos, sendo eles: Gleissolo, Latossolo, Neossolo e Nitossolo, conforme demonstrado pela Figura 2b. Gleissolos e Latossolos são solos profundos, bem drenados e, em geral, argilosos, apresentando boa capacidade de retenção de água, o que favorece a construção de viveiros escavados. Contudo, sua baixa fertilidade natural exige correção química para estimular a produtividade biológica. Neossolos constituem solos pouco desenvolvidos e apresentam restrições ao uso aquícola. Nitossolos são considerados favoráveis, pois apresentam textura argilosa, boa retenção hídrica, fertilidade relativamente elevada e estrutura que proporciona maior estabilidade aos taludes dos viveiros, sendo representado pela maior área da microbacia (Boyd, 2012; Embrapa, 2013; Werneck et al., 2024).

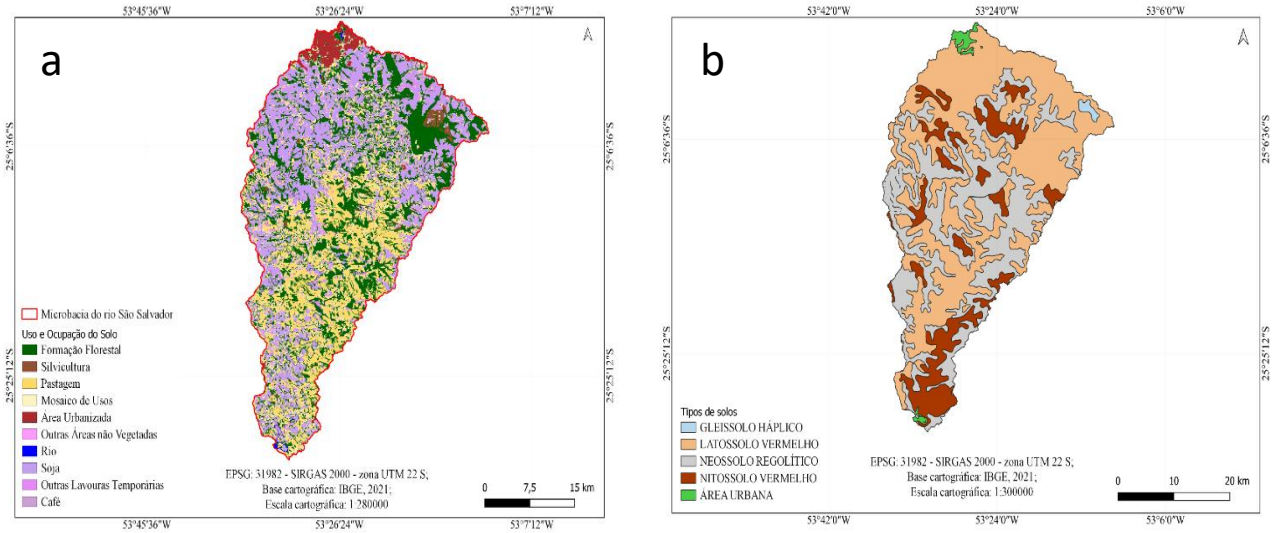


Figura 2: (a) Mapa de uso e ocupação do solo da microbacia hidrográfica do Rio Andrada, município de Cascavel – PR, inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu, (b) Tipos de solos encontrados na microbacia hidrográfica do Rio Andrada, município de Cascavel-PR, inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu.
Fonte: Elaboradas pelos autores, 2026.

Na bacia do Rio Andrada, foram registrados 322 viveiros escavados, com predominância de estruturas de pequeno porte. A distribuição dos viveiros conforme demonstrado na Tabela 3a, revela a predominância de pequenos empreendimentos em quantidades, sugerindo ocupação fragmentada da paisagem, possivelmente associada a produtores familiares. Entretanto, os viveiros de médio e grande porte, indicando maior pressão territorial e potencial de interferência na dinâmica hídrica da microbacia. Na mesma bacia hidrográfica, Morsoleto et al. (2023) evidenciam que a piscicultura no rio Cavernoso se consolidou como fonte de renda para pequenos produtores, impulsionando a diversificação agropecuária por meio de mudança da matriz produtiva, profissionalização e políticas públicas de fomento.

De acordo com (Cyrino et al., 2010) o acúmulo de fósforo (P) e nitrogênio (N) nos viveiros, quando não monitorado, pode prejudicar a qualidade da água na microbacia receptora. A mitigação dos impactos ambientais pode ser alcançada por meio da adoção de Boas Práticas de Manejo (BPM), que fortalecem a sustentabilidade da aquicultura (Coldebella et al., 2017). Conforme observado na Figura 3b, os viveiros de menor porte, em função de sua maior quantidade, apresentam contribuição mais expressiva nos aportes totais de nitrogênio (N) e fósforo (P) durante as fases de criação e despesca. Por outro lado, embora os viveiros de grande porte apresentem menor aporte total de fósforo (0,24 toneladas), as concentrações elevadas associadas a esses sistemas podem intensificar processos de eutrofização, promovendo o crescimento excessivo de algas e reduzindo a capacidade de autodepuração do corpo hídrico da microbacia. De acordo com o relatório ambiental referente ao ano de 2015 da Agathon Participações Ltda, em determinados pontos de amostragem o rio Andrada apresentou concentrações de coliformes termotolerantes suficientemente elevadas para seu enquadramento em Classe IV, de acordo com a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, o que constitui forte evidência de aporte de dejetos humanos e lançamento de esgoto doméstico in natura. É necessária a realização de monitoramento técnicoambiental contínuo dos parâmetros físico-químicos e biológicos dos corpos d'água utilizados para captação, de modo a assegurar a qualidade hídrica demandada pelas atividades agropecuárias.

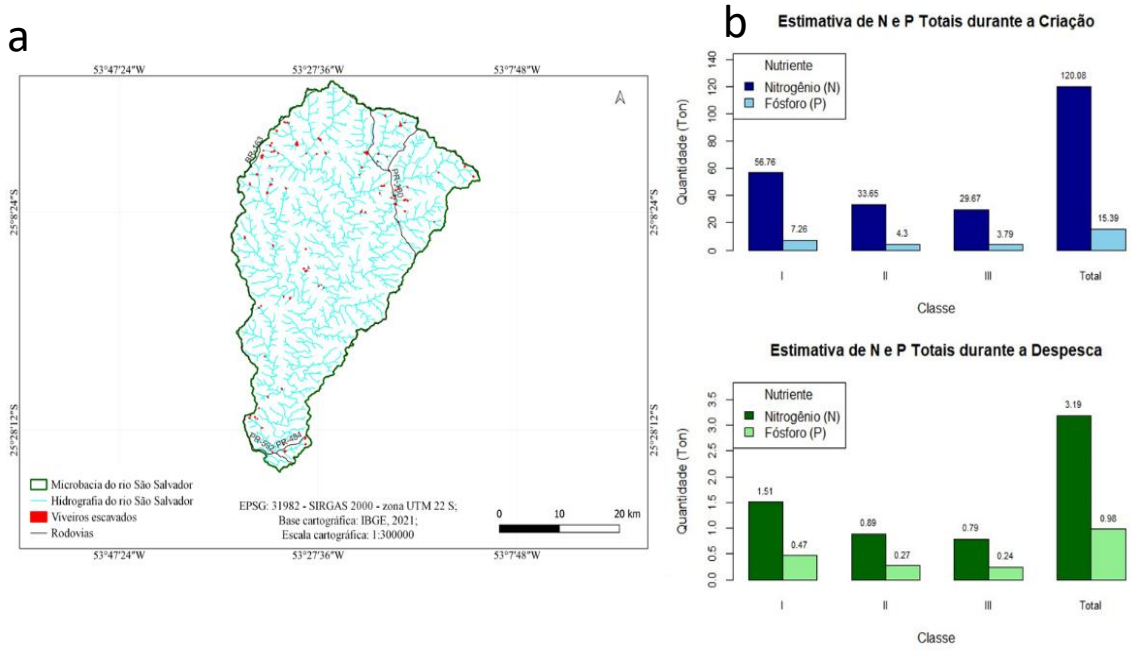


Figura 3: (a) Localização dos viveiros escavados na microbacia hidrográfica do Rio Andrada, município de Cascavel-PR, inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu, (b) Valores estimados de aporte de compostos nitrogenados e fosfatados oriundos de viveiros durante a criação e despesca de peixes, situados na região da microbacia do Rio Andrada, no município de Cascavel (PR), integrante da bacia hidrográfica do Rio Iguaçu.Fonte: Elaboradas pelos autores, 2026.

Considerações finais

Conclui-se que a microbacia do Rio Andrada apresenta aptidão ambiental para o desenvolvimento sustentável da piscicultura, em função de suas características morfométricos e da dinâmica hidrológica que favorece processos de autodepuração. Dessa forma, os aportes de nitrogênio e fósforo associados à atividade da piscicultura apresentam baixo potencial de comprometer a qualidade da água e os usos múltiplos do sistema hídrico. A aplicação de geotecnologias foi essencial para a compreensão das características físicas da bacia, evidenciando seu papel como ferramenta estratégica para o planejamento territorial e a expansão sustentável da atividade aquícola. Para estudos futuros, recomenda-se a realização de análises in loco que permitam validar os valores estimados de nutrientes

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro, ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca (PREP) pelo suporte institucional, e ao Grupo de Estudos em Manejo na Aquicultura (GEMAq) pela colaboração técnica e científica.

Referências Bibliográficas

AGATHON PARTICIPAÇÕES LTDA. (2015). RAS – Relatório Ambiental Simplificado: PCH Meireles [Relatório ambiental]. Curitiba, Brasil. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2021-05/ras_pch_sao_salvador-compress.pdf. Acesso em: Janeiro. 2026

ARAUJO, Analice Timoteo de et al. Estudo integrado da paisagem: análise ambiental e morfométrica da microbacia hidrográfica do rio Passo do Cuê, Paraná III. REVISTA REGEO, São José dos Pinhais, v.16, n.5, p.1-18, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.56238/revgeov16n5-193.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 135, n. 6, p. 470, 9 jan. 1997.

Boyd, C. E. (2012). Bottom soils, sediment, and pond aquaculture. Springer Science & Business Media. Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2005).

Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005: Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/

Coldebella, A., Gentelini, A., Piana, P., Coldebella, P., Boscolo, W., & Feiden, A. (2017). Effluents from Fish Farming Ponds: A View from the Perspective of Its Main Components. Sustainability, 10(1), 3. https://doi.org/10.3390/su10010003

Coldebella, A., Godoy, A. C., Gentelini, A. L., Piana, P. A., Coldebella, P. F., Boscolo, W. R., & Feiden, A. (2020). Nitrogen and phosphorus dynamics in Nile tilapia farming in excavated rearing ponds. Research, Society and Development, 9(11), e1319119699. https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.9699

Cyrino Souza, M. D., José, J. V., Pereira, L. B., Lima, L. S., Leite, K. N., & Moreira, J. G. do V. (2023). Caracterização fisiográfica e do uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica Treze de Maio no Oeste da Amazônia. Research, Society and Development, 12(1), e6412139278. https://doi.org/10.33448/rsd-v12i1.39278

Dias, Solange Irene Smolarek; DE CAMPOS, Rodrigo José. As bacias hidrográficas e o planejamento urbano: o caso de cascavel/PR. Revista Thêma et Scientia, v. 10, n. 2E, p. 52-91, 2020. Dornellas, P. da C., Xavier, R. A., Silva, R. M. da, & Seabra, V. da S. (2020). ANÁLISE MORFOMÉTRICA DA BACIA DO ALTO RIO PARAÍBA, REGIÃO SEMIÁRIDA DO ESTADO DA PARAIBA. Revista Brasileira de Geomorfologia, 21(3). https://doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1757

Dubey, S. (2020). Morphometric Analysis and Prioritization of Sub Watersheds of Umar Nala Watershed, Madhya Pradesh Using Geospatial Technique. International Journal of Agriculture Environment and Biotechnology, 13(3). https://doi.org/10.30954/0974-1712.03.2020.2

Embrapa. (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, 3. EMBRAPA. (2021). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

Francisco, H. R., Fabrício Corrêia, A., & Feiden, A. (2019). Classification of Areas Suitable for Fish Farming Using Geotechnology and Multi-Criteria Analysis. ISPRS International Journal of Geo-Information, 8(9), 394. https://doi.org/10.3390/ijgi8090394

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2023). TOPODATA – Mapa Índice. INSTITUTO ÁGUA E TERRA (IAT). Relatório Anual de Eventos Críticos – 2025. Curitiba, janeiro de 2026. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Monitoramento-deEventos-Hidrologicos-Criticos. Acesso em: jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. (2025). Geociências. Lewandowski, V., Leal, H. N. R., & Sary, C. (2024). Características físico-químicas do solo e sua importância para piscicultura. Revista de Ciências Agroveterinárias, 23(1), 99- 105. DOI: 10.5965/223811712312024099

MAPBIOMAS. (2025). Coleção 9: Mapas anuais de cobertura e uso da terra. Https://Mapbiomas.Org/. Miller, V. C. (1953). A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. Columbia University.

Morsoleto, F. M. Da S.; Macedo, H. R.; Monteiro, I. B.; Neves, M. M.; Da Silva, K. N.; De Oliveira, R. G.; Werneck, P. R.; Da Silva,

A. F. C.; Lira, K. C. Da S.; Francisco, H. R.; Feiden, A. Caracterização Da Morfometria Da Microbacia Hidrográfica Do Rio Cavernoso: Subsídios Para O Planejamento Sustentável Da Piscicultura. Caderno Pedagógico, [S. L.], V. 20, N. 3, P. 1280–1295, 2023. Doi: 10.54033/Cadpedv20n3- 001. Disponível Em: Https://Ojs.Studiespublicacoes.Com.Br/Ojs/Index.Php/Cadped/Article/View/1659. Acesso Em: 23 Mar. 2026

Negri, R., & Fill, H. (2023). Caracterização física de 14 bacias hidrográficas brasileiras: proposição do indicador da declividade média dos rios e do coeficiente de suscetibilidade de enchentes. Engenharia Sanitaria e Ambiental, 28. https://doi.org/10.1590/s1413-415220220194

NEVES, A. K., KÖRTING, T. S., FONSECA, L. M. G., & ESCADA, M. I. S. (2020). Assessment of TerraClass and MapBiomas data on legend and map agreement for the Brazilian Amazon biome. Acta Amazonica, 50(2), 170–182. https://doi.org/10.1590/1809-4392201900981

PARANÁ. Lei nº 12.726, de 29 de novembro de 1999. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e adota outras providências. Diário Oficial do Estado do Paraná: Poder Executivo, Curitiba, PR, n. 5504, p. 1, 30 nov. 1999.

Peruzzo, J. de S., Silvino, G. da S., Araújo, M. C. P. de, Leon, M. J. de, Arruda Filho, N. T. de, & Lisboa, F. D. S. (2022). Caracterização morfométrica das micro bacias hidrográficas inseridas no município e Itaporanga (PB). Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, 13(3), 92–104. https://doi.org/10.6008/CBPC2179- 6858.2022.003.0008

QGIS DEVELOPMENT TEAM. (2025). QGIS Geographic Information System (3.22.14 biatowieza). Open Source Geospatial Foundation Project. Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. Geological Society of America Bulletin, 67(5), 597–646. Schumm, S. A. (1963). Sinuosity of alluvial rivers on the Great Plains. Geological Society of America Bulletin, 74(9), 1089–1100.

SEDEST – Secretaria De Estado Do Desenvolvimento Sustentável E Do Turismo. Caracterização E Diagnóstico Da Unidade De Gerenciamento Dos Recursos Hídricos Do Baixo Iguaçu. Curitiba: Sedest, 2012. Disponível Em: Https://Www.Sedest.Pr.Gov.Br/Sites/Default/Arquivos_Restritos/Files/Migrados/File/Cerh_-_19_Ro/Caracterizacao_Diagnostico_Ugrhi_Baixo_Iguacu.Pdf. Acesso Em: 18 Mar. 2026.

Silva, D. C. da C. e, Albuquerque Filho, J. L., Sales, J. C. A., & Lourenço, R. W. (2016). Uso de Indicadores Morfométricos como Ferramentas para Avaliação de Bacias Hidrográficas (Use of Morphometric Indicators as Tools for Assessment Watershed). Revista Brasileira de Geografia Física, 9(2), 627–642. https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.2.p627-642 Soni, S. (2017). Assessment of morphometric characteristics of Chakrar watershed in Madhya Pradesh India using geospatial technique. Applied Water Science, 7(5), 2089– 2102. https://doi.org/10.1007/s13201-016-0395-2

Souza, C. F. de, Pertille, C. T., Schramm Corrêa, B. J., & Vieira, F. S. (2018). CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVAÍ - PARANÁ. Geoambiente On-Line, (29). https://doi.org/10.5216/revgeoamb.v0i29.50602

Tonello, K. C., Dias, H. C. T., Souza, A. L. de, Ribeiro, C. A. A. S., & Leite, F. P. (2006). Morfometria da bacia hidrografica da Cachoeira das Pombas, Guanhães - MG. Revista Árvore, 30(5), 849–857. https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000500019

TRAJANO, S. R. R. da S., Spadotto, C. A., Holler, W. A., Daltio, J., Martinho, P. R. R., Fois, N. S., SANTOS, B. B. de O., TOSCHI, H. H., LISBOA, F. S., & TRAJANO, S. R. R. D. A. S. (2012). Análise Morfométrica de Bacia Hidrográfica: Subsídio à Gestão Territorial Estudo de Caso no Alto e Médio Mamanguape.

Villela, S. M., & Mattos, A. (1975). Hidrologia aplicada. Editora McGraw-Hill do Brasil. WALM ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL LTDA. Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno do Reservatório da UHE Baixo Iguaçu (PACUERA). São Paulo: WALM, 2022. 352 p.

Werneck, P R, Macedo, H. R., Morsoleto, F. M. da S., Lira da Silva, K. C., & Feiden, A. (2023). Use of georeferencing as a sustainable planning tool for aquaculture production in small municipalities: a case study for Ouro Verde do Oeste/PR. Research, Society and Development, 12(3).

Werneck, P. R., Macedo, H. R., Mosoleto, F. M. da S., & Feiden, A. (2024). ANÁLISE DA PISCICULTURA, APORTE DE NUTRIENTES E PRODUÇÃO DA MICROBACIA HIDROGRÁFICA DO RIO OCOY. ARACÊ, 6(4), 14677–14691. https://doi.org/10.56238/arev6n4-215

ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE PILAR, ALAGOAS - BRASIL

1 Eduarda Pinheiro Barbosa da Silva, 2 Erik Eduardo Honorio Pereira, 3 Natan Monteiro Melo, 4 Micaias Antônio dos Santos Junior, 5Manoel Mariano Neto

1 Universidade Federal de Alagoas, e-mail: eduarda.silva@delmiro.ufal.br; 2 Universidade Federal de Alagoas, e-mail: erik.pereira@arapiraca.ufal.br; 3 Universidade Federal de Alagoas, e-mail: natan.melo@delmiro.ufal.br; 4 Universidade Federal de Alagoas, e-mail: juni_192@hotmail.com; 5 Universidade Federal de Alagoas, e-mail: manoel.mariano@ctec.ufal.br

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Geoprocessamento; Planejamento Urbano.

Resumo

As inundações urbanas têm se intensificado nas últimas décadas, em decorrência da interação entre fatores naturais e antrópicos, como alterações no regime de precipitação, crescimento urbano desordenado e impermeabilização do solo. Desse modo, o estudo teve como objetivo analisar a suscetibilidade à ocorrência de inundações na área urbana do município de Pilar, Alagoas, por meio da integração de variáveis físicas e antrópicas em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). A metodologia adotada baseou-se na análise multicritério proposta por Korah e López (2015), considerando declividade, fluxo acumulado, uso e cobertura do solo e a precipitação. Os resultados evidenciaram que a baixa declividade favorece a acumulação de água, enquanto o padrão de uso e cobertura do solo, intensamente modificado pela ação antrópica, contribui para o aumento do escoamento superficial e a redução da infiltração. A análise hidrológica indicou maior concentração de fluxo nas áreas mais baixas, especialmente na planície flúvio-lagunar associada à Laguna Manguaba, configurando zonas com maior propensão à ocorrência de inundações. A precipitação anual média, variando entre 1555 mm e 1690 mm, atua como um fator intensificador dos eventos, sobretudo quando associada às condições físicas e à ocupação inadequada do solo. A integração das variáveis permitiu identificar que as áreas mais suscetíveis se concentram em regiões planas, próximas à laguna e sujeitas ao aumento do nível da água durante eventos pluviométricos intensos.

Introdução

As inundações configuram-se entre os fenômenos climáticos mais frequentemente associados à ocorrência de óbitos, evidenciando seu elevado potencial de impacto sobre a população (Klemas, 2015). Esses eventos ocorrem tanto em áreas urbanas quanto rurais, afetando diferentes regiões do globo. Entretanto, no contexto urbano, configura-se como um grave risco, com implicações significativas nos âmbitos social, econômico e ambiental (Adeyeye; Emmitt, 2017).

Um dos principais fatores associados à ocorrência de inundações são as mudanças climáticas, que se intensificam ao longo dos anos e altera os padrões de precipitação. Adicionalmente, o avanço da urbanização, aliado ao crescimento populacional, especialmente em áreas caracterizadas por maior fragilidade ambiental também contribui para o aumento do risco de inundações urbanas (Hemmati; Ellingwood; Mahmoud, 2020; Zhu et al., 2022).

No Brasil, Tucci (2023) aponta que as inundações são agravadas pelo aumento das áreas impermeabilizadas, presença de obstruções ao escoamento e pela implantação de obras de drenagem artificiais. Adicionalmente, tais eventos podem decorrer da ocupação de planícies de inundação e de modificações no uso do solo, ressaltando-se que, nesse contexto, os impactos se intensificam diante do conhecimento insuficiente acerca da frequência e dos níveis de água associados às inundações, bem como de deficiências no planejamento da ocupação do espaço.

Eventos dessa natureza são registrados em diversas regiões do país, afetando diretamente a população, com a ocorrência de deslizamentos de terra, perdas de vidas humanas e impactos sobre o cotidiano das comunidades. Além disso, comprometem a infraestrutura e os serviços urbanos, promovem o assoreamento de rios e contribuem para a degradação de ecossistemas (Pillar; Overbeck, 2024; Simoes-Sousa et al., 2025).

Desse modo, medidas de investigação e mitigação têm sido adotadas para minimizar seus prejuízos. O o geoprocessamento e sensoriamento remoto têm se consolidado como ferramentas capazes de identificar e analisar áreas com maior risco de ocorrência de inundações, e, subsidiar a definição de medidas de controle de forma antecipada (Almouctar et al., 2024; Korah; Mariano; López, 2015; M Amen et al., 2023; Zhang et al., 2025).

Este trabalho teve por objetivo analisar espacialmente a suscetibilidade à ocorrência de inundações urbanas no município de Pilar, no estado de Alagoas, Brasil. Para tanto, foi empregada a análise multicritério combinada com ferramentas de geoprocessamento. A escolha da área de estudo se deu em função das características fisiográficas, geomorfológicas e das condições climáticas, favoráveis à ocorrência desse fenômeno (CPRM 2017; 2022).

Material e Métodos

Área de Estudo

O município de Pilar, localizado na porção leste do estado de Alagoas, integra a Região Metropolitana de Maceió e possui uma população estimada em 36.525 habitantes, distribuída em uma área territorial de aproximadamente 259.646 km² (IBGE, 2022), conforme apresentado na Figura 1.

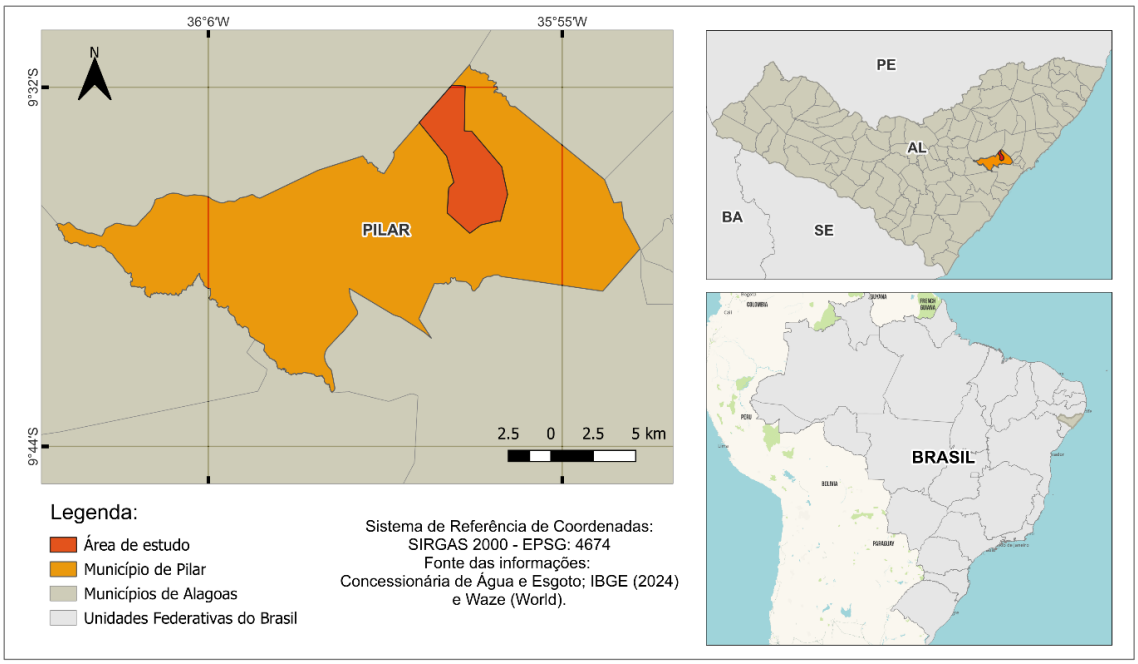


Figura 01: Mapa de localização da cidade de Pilar, no estado de Alagoas.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

O município de Pilar (AL) insere-se predominantemente na bacia do rio Mundaú, tendo Laguna Manguaba como elemento central do sistema hidrológico, que recebe contribuições do rio Mundaú e estabelece conexão com o rio Paraíba (Lourenço, 2023). O município é margeado pela Laguna Manguaba e abrange, ainda, áreas das bacias hidrográficas dos rios Paraíba do Meio, Sumaúma e seus respectivos afluentes (InfoSanbas, 2021).

O clima é classificado como megatérmico subúmido, com ocorrência de chuvas ao longo de todo o ano, sendo o mês de junho o mais chuvoso, com precipitação média de 158 mm. Do ponto de vista geomorfológico, o relevo é caracterizado por baixo planalto sedimentar e planície flúvio-lagunar (Costa, 2023). A altitude do município varia entre 0 m, nas proximidades da Laguna Manguaba, e cerca de 200 m no topo dos tabuleiros (Lourenço, 2023).

De acordo com o Sistema de Informações em Saneamento Básico, a taxa de urbanização do município corresponde a 2,46% (Brasil, 2024), valor superior aos observados para o Brasil (0,57%), para a região de referência (0,75%) e para o estado de Alagoas (2,13%), indicando maior grau de urbanização em comparação às demais escalas territoriais.

Procedimentos Metodológicos

A metodologia seguiu a proposta de Korah e López (2015), estruturada em cinco blocos principais: (i) base topográfica, representada pela declividade do relevo; (ii) análise hidrológica, por meio do fluxo acumulado; (iii) uso e cobertura do solo; (iv) precipitação; e (v) análise multicritério. Os dados foram organizados, processados e integrados a partir em ambiente SIG, através do software QGIS, versão 3.40.5.

A declividade corresponde à taxa máxima de variação do valor altimétrico (z) em cada célula do raster, expressa em graus. Essa variável foi calculada a partir do MDE disponibilizado pela concessionária de saneamento local, o qual possui resolução espacial de 1 metro e foi elaborado no ano de 2021 Para o estudo, considerou-se que os valores mais elevados de declividade indicam maior potencial de escoamento superficial, enquanto áreas com menores inclinações apresentam maior propensão à concentração de água em situações de escoamento superficial. O mapa de declividade foi reclassificado em quatro classes, conforme apresentado na Tabela 1.

Declividade (Graus)	Escala	Interpretação
> 51	1	Não suscetível
23 - 51	2	Baixa suscetibilidade
9 - 23	3	Suscetibilidade moderada
0 - 9	4	Alta suscetibilidade

Tabela 01: Critérios de reclassificação da declividade.
Fonte: Korah e López (2015).

A análise hidrológica foi conduzida em três etapas principais. Inicialmente, realizou-se a remoção de depressões artificiais do MDE, com o objetivo de garantir a continuidade do escoamento superficial, utilizando a ferramenta *r.fill.dir*. Em seguida, o fluxo acumulado foi calculado por meio da ferramenta *r.watershed*, que possibilita a identificar a direção e a concentração do escoamento superficial da água a partir do modelo de elevação.

O fluxo acumulado representa o número de células que contribuem para o escoamento em um determinado ponto, constituindo um indicador relevante para a identificação de áreas potencialmente suscetíveis à concentração de água. Os valores resultantes foram reclassificados em quatro classes de vulnerabilidade, conforme os intervalos apresentados na Tabela 2.

Fluxo Acumulado	Escala	Interpretação
0 - 1600	1	Não suscetível
1601 - 5500	2	Baixa suscetibilidade
5501 - 18000	3	Suscetibilidade moderada
> 18000	4	Alta suscetibilidade

Tabela 02: Critérios de reclassificação do fluxo acumulado.
Fonte: Korah e López (2015).

Os dados de uso e cobertura do solo foram obtidos para o ano 2024, a partir da plataforma MapBiomas. Para atender às especificidades metodológicas, este produto foi reclassificado, conforme descrito na Tabela 3.

Uso e cobertura do solo	Escala	Interpretação
Vegetação nativa	1	Não suscetível
Áreas em regeneração e florestas plantadas	2	Baixa suscetibilidade
Áreas agrícolas e pastagens	3	Suscetibilidade moderada
Solo exposto e área urbana	4	Alta suscetibilidade

Tabela 03: Critérios de reclassificação do uso e cobertura do solo.
Fonte: Korah e López (2015).

Na análise pluviométrica, procedeu-se, inicialmente, à aquisição dos dados das estações pluviométricas localizadas na área de estudo. Essa etapa foi realizada no software QGIS, por meio da ferramenta *ANA Data Acquisition*. Após a identificação das estações com dados disponíveis, efetuou-se a busca dessas informações na plataforma do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), por meio do sistema HidroWeb, onde foram obtidas as séries históricas correspondentes. Para o estudo, utilizaram-se os dados das estações Fazenda Boa Fortuna (935056), Marechal Deodoro (935057) e Atalaia (936110).

Foi considerada uma série histórica no período de 2014 a 2024, a partir da qual se calculou a precipitação média anual para cada estação. Posteriormente, os dados foram tratados e interpolados pelo método IDW, com o objetivo de estimar a distribuição espacial da pluviometria na área de estudo. Para a reclassificação dos valores, adotaram-se os critérios estabelecidos por Korah e López (2015), apresentados na Tabela 4.

Após a elaboração e reclassificação dos mapas temáticos, as variáveis foram integradas em ambiente SIG por meio da álgebra de mapas. Nessa etapa, foram aplicados os pesos propostos por Korah e López (2015), conforme a Equação (1).

Precipitação (mm/ano)	Escala	Interpretação
1550 - 1585	1	Não suscetível
1585 - 1620	2	Baixa suscetibilidade
1620 - 1655	3	Suscetibilidade moderada
1655 – 1690	4	Alta suscetibilidade

Tabela 04: Critérios de reclassificação do uso e cobertura do solo.
Fonte: Korah e López (2015).

$$AI = (0.15 * D) + (0.35 * FA) + (0.20 * UC) + (0.30 * P) \qquad (1)$$

Onde: *AI* são as áreas suscetíveis às inundações, *D* é declividade, *FA* e fluxo acumulado, *UC* é o uso e cobertura do solo e *P* é Precipitação.

Resultados e Discussão

A declividade é um fator fundamental no controle da velocidade do escoamento superficial e dos processos hidrológicos associados. Como ilustrado na Figura 2a, há predomínio de áreas com baixa declividade (0–9°) em quase toda a área analisada, o que caracteriza um relevo plano. As declividades de (23–51°) ocorrem de maneira pontual, concentradas principalmente nas bordas e em áreas de transição do relevo montanhoso. Esse padrão sugere maior suscetibilidade à acumulação de água e

inundações nas áreas mais planas. Como consequência, essas regiões tornam-se mais suscetíveis à ocorrência de alagamentos e inundações, especialmente quando associadas a elevados índices pluviométricos.

Os dados de uso e cobertura do solo (Figura 2b) evidenciam um padrão fortemente modificado pela ação antrópica, caracterizado pela redução e fragmentação da vegetação natural. A predominância de áreas ocupadas por atividades agrícolas, pastagens e zonas urbanizadas contribui para o aumento do escoamento superficial e a redução da infiltração de água no solo, favorecendo a intensificação de processos erosivos, sobretudo em áreas com solo exposto. Nesse contexto, o município pode ser classificado como de suscetibilidade moderada a alta, em função da influência dos processos antrópicos sobre a dinâmica ambiental.

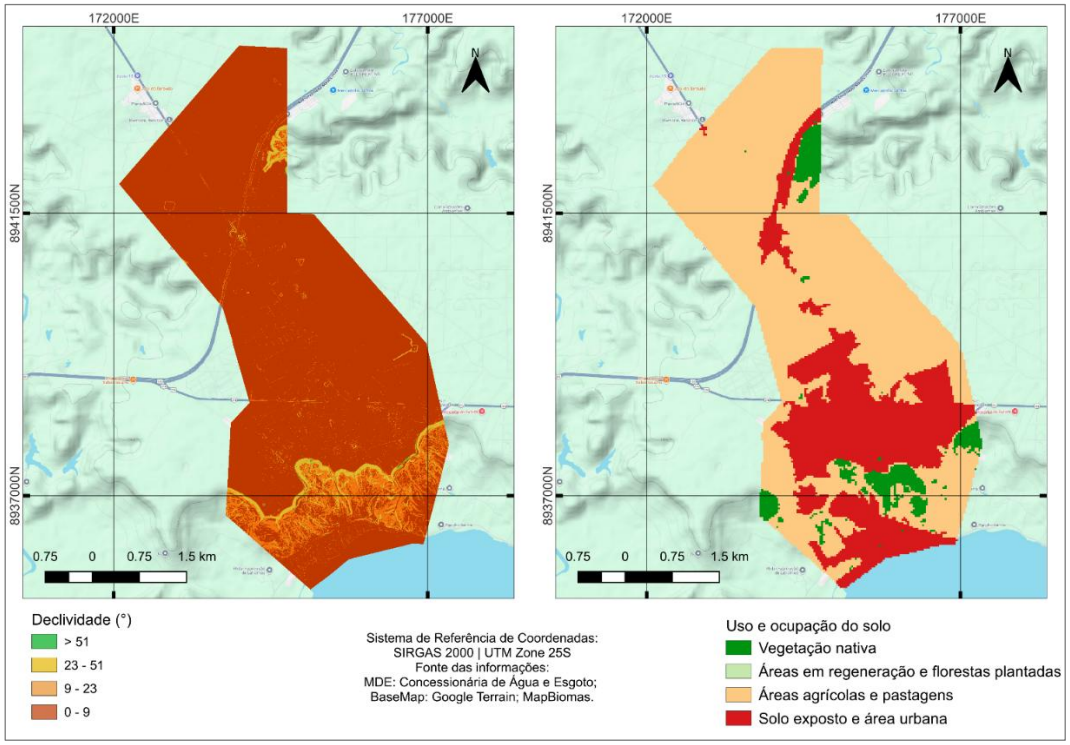


Figura 02: a) Declividade da área urbana de Pilar, b) Uso e cobertura do solo.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A análise da drenagem consiste em identificar o sentido preferencial do escoamento e as áreas de concentração do fluxo hídrico. A direção do fluxo indica os trajetos prováveis do escoamento superficial da água a partir do modelo digital de elevação. O padrão de drenagem predominante dos cursos d'águas da área de estudo é do tipo pinado com variação para o dendrítico, o alto acúmulo do fluxo aculumado foi identificado na planície flúvio-lagunar (Figura 3a), porção da região banhado pela Laguna Manguaba. As zonas com alto fluxo acumulado correspondem, em geral, às áreas mais baixas do relevo, onde a água proveniente das porções mais elevadas tende a se concentrar. Essas regiões apresentam maior propensão à ocorrência de inundações, sobretudo em períodos de chuvas intensas, quando a capacidade de drenagem é excedida.

As inundações estão, em grande parte, associadas a eventos de precipitação intensa, nos quais o volume de água precipitado excede a capacidade de infiltração do solo, favorecendo o escoamento superficial e o acúmulo de água nas encostas. Esse escoamento está diretamente relacionado à quantidade de chuva incidente em uma determinada área.

Na área de estudo, a precipitação anual média varia entre 1555 mm e 1690 mm, com maiores valores concentrados na porção sul da área urbana do município de Pilar (Figura 3b). Nesse contexto, a precipitação configura-se como um importante fator intensificador do risco de inundações, especialmente quando associada a condições físicas e antrópicas que potencializam o escoamento superficial e reduzem a infiltração.

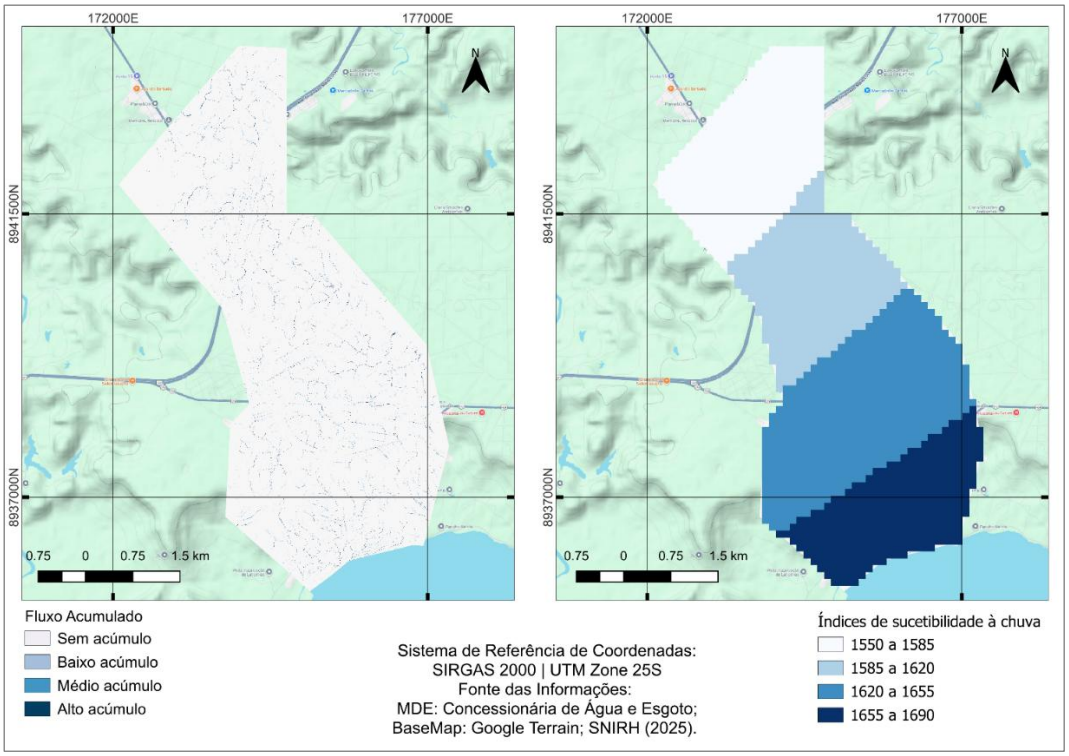


Figura 03: a) Fluxo acumulado na área urbana de Pilar, b) Distribuição espacial da precipitação anual.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Ao integrar as variáveis, conforme a proposição de Korah e López (2015), foi possível determinar a suscetibilidade às inundações na porção urbana do município de Pilar (Figura 4). As áreas com maior suscetibilidade concentram-se em regiões de baixa declividade. Quando ocorre um evento de precipitação elevada, o nível da Laguna Manguaba aumenta e, consequentemente, pode exceder as cotas críticas de transbordamento, o que leva à inundação da planície flúvio-lagunar.

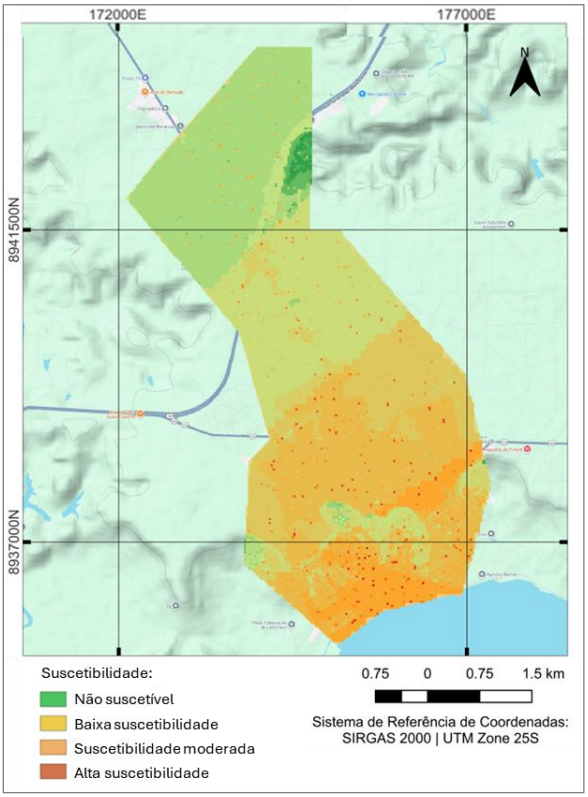


Figura 04: Suscetibilidade à inundação na área urbana de Pilar.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Os processos de inundação e alagamento, entre outros impactos associados, fazem parte da dinâmica natural dos cursos d'água e costumam ocorrer em decorrência de precipitações intensas e concentradas, sendo atualmente potencializados, sobretudo em áreas urbanizadas, pelas intervenções humanas.

A proximidade da Laguna Manguaba em relação aos núcleos urbanos, associada à ocupação irregular de áreas planas e de várzea em suas margens, contribui para o aumento da exposição da população a eventos hidrológicos extremos.

Considerações Finais

A análise integrada das variáveis permitiu identificar os principais condicionantes da suscetibilidade às inundações na área urbana do município de Pilar. Os resultados evidenciam que a baixa declividade predominante favorece a acumulação de água, enquanto o padrão de uso e cobertura do solo, marcado pela intensa intervenção antrópica, contribui para a redução da infiltração e o aumento do escoamento superficial.

A dinâmica de drenagem, aliada à presença da planície flúvio-lagunar associada à Laguna Manguaba, reforça a tendência de concentração de fluxos em áreas mais baixas, ampliando a propensão à ocorrência de eventos de inundação, especialmente em períodos de precipitação intensa.

A integração das variáveis em ambiente SIG mostrou-se eficiente na identificação das áreas mais suscetíveis. As áreas de maior suscetibilidade concentram-se, sobretudo, em regiões planas, próximas à laguna e sujeitas à influência direta do aumento do nível da água.

Agradecimentos

Os Autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ADEYEYE, K.; EMMITT, S. Multi-scale, integrated strategies for urban flood resilience. **International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment,** [*s. l.*], vol. 8, no 5, p. 494–520, 2017.

ALMOUCTAR, M. A. S.; WU, Y., AN, S.; YIN, X.; QIN, C.; ZHAO, F.; QIU, L. Flood risk assessment in arid and semi-arid regions using Multi-criteria approaches and remote sensing in a data-scarce region. **Journal of Hydrology:** Regional Studies, [*s. l.*], vol. 54, p. 101862, 2024.

BRASIL. Ministério das Cidades**. Resultados SINISA 2025 – Indicadores de Águas Pluviais Urbanas.** Disponível em: https://indicadores-sinisa-2025.cidades.gov.br/dashboard?modulo=aguas_pluviais. Acesso em: 06 jan 2026.

COSTA, G. I. **Os aspectos geográficos da cidade de Pilar/Alagoas nas aulas de geografia.** 2023. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) – Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Ação emergencial para reconhecimento do risco remanescente em áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massa e inundações, em situações de pós-desastres naturais: Pilar – AL.** Recife: CPRM, [2017].

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Avaliação técnica pós-desastres – Pilar, AL.** S/L: CPRM, 2022.

HEMMATI, M.; ELLINGWOOD, B. R.; MAHMOUD, H. N. The Role of Urban Growth in Resilience of Communities Under Flood Risk. **Earth's Future,** [*s. l.*], vol. 8, no 3, 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pilar (AL).** Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/al/pilar.html. Acesso em: 10 jan 2026.

INFOSANBAS. **Pilar – AL.** Disponível em: https://infosanbas.org.br/municipio/pilar-al/#distribuicao. Acesso em: 10 jan 2026.

KLEMAS, V. Remote Sensing of Floods and Flood-Prone Areas: An Overview. **Journal of Coastal Research**, [*s. l.*], vol. 314, p. 1005–1013, 2015.

KORAH, I.; MARIANO, F.; LÓPEZ, J. Mapping Flood Vulnerable Areas in Quetzaltenango, Guatemala using GIS. **Journal of Environment and Earth Science**, [*s. l.*], vol. 5, no 6, p. 132–142, 2015.

LOURENÇO, R. M.G. **Identificação das áreas de fragilidade ambiental no núcleo urbano do município de Pilar, Alagoas.** 2023. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) – Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

M AMEN, A. R.; MUSTAFA, A.; KAREEM, D. A.: HAMEED, H. M.; MIRZA, A. A.; SZYDŁOWSKI, M. M; SALEEM, B. K. Mapping of Flood-Prone Areas Utilizing GIS Techniques and Remote Sensing: A Case Study of Duhok, Kurdistan Region of Iraq. **Remote Sensing**, [*s. l.*], vol. 15, no 4, p. 1102, 2023.

PILLAR, V. D.; OVERBECK, G. E. Learning from a climate disaster: The catastrophic floods in southern Brazil. **Science**, [*s. l.*], vol. 385, no 6713, 2024.

SIMOES-SOUSA, I. T.; CAMARGO, C. M.; TAVORA, J.; PIFFER-BRAGA, A.; FARRAR, J. T.; PAVELSKY, T. M. The May 2024 Flood Disaster in Southern Brazil: Causes, Impacts, and SWOT-Based Volume Estimation. **Geophysical Research Letters**, [*s. l.*], vol. 52, no 4, 2025.

TUCCI, C. E. M. Investigation of dealing with urban flooding in Brazil. **Research in Marine Sciences**, [*S. l.*]: [*s. d.*], 2023.

ZHANG, M.; FU, X.; LIU, S.; ZHANG, C. Integrating Remote Sensing and Machine Learning for Actionable Flood Risk Assessment: Multi-Scenario Projection in the Ili River Basin in China Under Climate Change. **Remote Sensing**, [*s. l.*], vol. 17, no 7, p. 1189, 2025.

ZHU, W.; CAO, Z.; LUO, P.; TANG, Z.; ZHANG, Y.; HU, M.; HE, B. Urban Flood-Related Remote Sensing: Research Trends, Gaps and Opportunities. **Remote Sensing,** [*s. l.*], vol. 14, no 21, p. 5505, 2022.

FIRE REGIME TRANSITIONS IN THE STATES OF MARANHÃO, TOCANTINS, PIAUÍ, AND BAHIA: A 20-YEAR ANALYSIS USING MAPBIOMAS DATA

1 Danyella Santos Silveira , 2 Davi de Souza Ferreira, 3 Fabrissa Cotrim Pires, 4 Magno Lucas Alcantara Silva, 5 Antônio Gabriel Rocha Silva, 6 Allandelon Silva Maciel, 7 Joseane Oliveira da Silva

1 Instituto Federal da Bahia, e-mail: danyella2024silveira@gmail.com; 2 Instituto Federal da Bahia, e-mail: dsferreira0705@gmail.com ; 3 Instituto Federal da Bahia, e-mail: fahcotrim4@gmail.com; 4 Instituto Federal da Bahia, e-mail: lucasalcantara2501@gmail.com; 5 Instituto Federal da Bahia, e-mail: gabrielpessoa541@gmail.com; 6 Instituto Federal da Bahia, e-mail: allandelonmaciel45@gmail.com; 7 Instituto Federal da Bahia, e-mail: joseaneos@ifba.edu.br

Keywords: Fire regimes; MATOPIBA; Anthropogenic decoupling.

Abstract

This study analyzes the temporal dynamics of fire regimes across the states of Maranhão, Tocantins, Piauí, and Bahia—collectively forming the MATOPIBA macro-region, analyzed at the state level—between 2000 and 2020. Utilizing burned area and land-use data from MapBiomas Fire Collection 4, we categorized fire occurrences into natural (native vegetation) and anthropogenic (agricultural land use) proxies to identify evidence of changes in fire drivers. The results indicate a shift from climate-driven to management-driven fire regimes, particularly in more consolidated agricultural areas. State-level analyses reveal significant heterogeneity: while Bahia shows a stabilized anthropogenic fire baseline and declining natural fire signals due to landscape fragmentation, Tocantins retains high magnitudes of ecological fire coupled with natural climatic variability. Maranhão and Piauí exhibit mixed regimes, reflecting active land-conversion phases. These findings suggest that in advanced frontier stages, fire occurrence increasingly reflects agricultural decision-making alongside meteorological conditions. Understanding this anthropogenic decoupling is critical for establishing integrated fire management policies and ensuring biodiversity conservation in the Brazilian Cerrado

Introduction

The “Cerrado” refers to a vast tropical savanna biome in central Brazil composed of a heterogeneous mosaic of woodlands, savannas, grasslands, gallery and dry forests (Eiten, 1977; Ribeiro et al., 1981). It is the second largest of Brazil’s major biomes, surpassed only by the Amazon, and occupies approximately 21% of the national territory. Advances in agricultural technology have enabled the productive use of its naturally acidic and nutrient-poor soils, the Cerrado has been described as one of the world’s last great agricultural frontiers (Borlaug, 2002).

Despite its economic importance, the Cerrado holds exceptional ecological value. It is recognized as one of the world’s biodiversity hotspots (Myers et al., 2000; Silva & Bates, 2002), a designation reserved for regions that simultaneously exhibit high levels of endemism and have lost at least 70% of their original native vegetation. This makes the Cerrado a global conservation priority. Current estimates indicate that at least 137 animal species native to the Cerrado are threatened with extinction, primarily as a result of large-scale agricultural expansion and intensive local extraction of forest products (Fundação Biodiversitas, 2005; Hilton-Taylor, 2004).

Fire is a central disturbance agent shaping both the ecological dynamics and land-use practices of the Cerrado. Although the biome evolved with natural fire regimes, contemporary fire occurrence is anthropogenic and closely associated with land clearing and agricultural management. Tansey et al. (2004) estimated that approximately 67% of the total area burned in Brazil in the year 2000 occurred within the Cerrado, underscoring its disproportionate contribution to national fire statistics. These patterns highlight the Cerrado’s prominent role in Brazil’s fire dynamics and underscore the importance of understanding the drivers and ecological consequences of fire in the biome.

Beyond biodiversity, the Cerrado plays a critical role in regional and continental hydrological regulation. Field-based studies indicate that Cerrado trees and shrubs possess deep root systems capable of accessing water stored in deep soil layers during the dry season, a trait that supports sustained evapotranspiration and atmospheric moisture recycling (Oliveira et al., 2005). This unique ecological function has led the biome to be described as the “cradle of waters” or an “inverted forest”.The removal of native vegetation disrupts this hydrological pump, reducing moisture recycling, altering rainfall patterns, and increasing vulnerability to drought.

Emerging climate-change scenarios suggest that these pressures intensify in the coming decades. Model projections indicate potential contractions in the geographic distribution of Cerrado vegetation under future climate conditions, particularly when climate stressors interact with ongoing land-use change and altered fire regimes. Such interactions raise critical questions about whether traditional climate–fire relationships observed in relatively intact ecosystems remain valid within highly transformed agricultural frontiers.

In savanna ecosystems, fire activity has traditionally been closely linked to climatic variability, particularly precipitation deficits and seasonal drought conditions. Numerous studies have demonstrated that meteorological drought increases fuel dryness and flammability, thereby elevating fire probability and burned area extent. In this classical framework, fire is largely understood as a climate-driven disturbance, responding predictably to rainfall anomalies and dry-season intensity. Such dynamics are especially relevant in agricultural frontiers, where fire simultaneously functions as a land-clearing tool, a management practice, and a hazard. In these contexts, understanding fire dynamics requires moving beyond static climate–fire correlations toward analyses that explicitly

consider temporal change and human intervention.

Recent advances in spatial analysis have revealed strong regional heterogeneity in Cerrado fire regimes. Segura-Garcia et al. (2025) identified distinct "Fire Regions" across the biome using clustering techniques, demonstrating that fire behavior varies systematically with land-use intensity and development stage. Their results highlight a "Human-Fire Paradox," where highly developed regions exhibit reduced fire occurrence due to suppression, while expanding agricultural frontiers experience increasing fire frequency and intensity.

Building on this regional differentiation, the MATOPIBA region emerges as a critical focus for examining anthropogenic fire–climate interactions. MATOPIBA is the acronym used to describe portions of the Cerrado within four Brazilian states—Maranhão, Tocantins, Piauí, and Bahia—currently undergoing rapid land-use transformation. Representing the most recent and dynamic agricultural frontier in Brazil, the region spans approximately 73 million hectares and encompasses 337 municipalities, positioning it as a strategic driver of national agricultural production (Lima et al., 2019).

This frontier has attracted producers from multiple regions of Brazil and is characterized by intensive land-use transformation, particularly the expansion of mechanized soybean and double-cropping systems (Pires et al., 2016). Biophysically, Matopiba exhibits features that heighten its sensitivity to climate stress, including predominantly low altitudes, persistently high temperatures, and, in several subregions, restrictive and highly seasonal rainfall regimes (de Almeida et al., 2024). These environmental conditions increase the sensitivity of land management and agricultural production to climatic variability. They also contribute to conditions that favor fuel desiccation during dry periods, increasing vulnerability to drought-related fire activity.

As a result, Matopiba represents a socio-ecological transition zone where fire regimes are increasingly shaped by political, economic, and management decisions rather than climatic constraints alone. The coexistence of preserved native vegetation, rapidly expanding mechanized agriculture, and active fire use for land management makes the region particularly suitable for investigating whether traditional drought–fire couplings are weakening under frontier dynamics.

Reliable detection of fire activity is fundamental for assessing the evolution of fire regimes, especially in agricultural frontiers where fires tend to be small, fragmented, and frequent. Utilizing long-term, standardized satellite-derived datasets allows for a consistent analysis of how fire patterns change as native vegetation is converted into managed land. By associating burned area detections with specific land-use and land-cover classes, it is possible to distinguish between ecological fires in native formations and anthropogenic fires used for agricultural management. This differentiation is a key indicator of whether fire remains an ecologically regulated process or has transitioned into a human-controlled tool.

Therefore, the objective of this study is to analyze the temporal dynamics of fire regimes across the states of Maranhão, Tocantins, Piauí, and Bahia—analyzed as a macro-regional system representing MATOPIBA—between 2000 and 2020. Using burned area and land-use data from MapBiomas, we aim to identify evidence of anthropogenic decoupling by comparing fire occurrence in native vegetation versus agricultural land-use classes.

Methodology

This study investigates fire regime dynamics across the states of Maranhão, Tocantins, Piauí, and Bahia, analyzed as a macro-regional system representing the MATOPIBA region within the Brazilian Cerrado biome. This macro-region represents one of the most rapidly transforming savanna landscapes in South America due to mechanized soybean cultivation and pasture expansion. The Cerrado biome is characterized by diverse vegetation formations (Eiten, 1977; Ribeiro et al., 1981) that evolved under recurrent fire regimes (Oliveira et al., 2005). However, rapid land-use transformation has modified ignition patterns, fuel continuity, and fire seasonality. As illustrated in Figure 01, while MATOPIBA occupies specific portions of these states, this study utilizes the complete administrative boundaries of Maranhão, Tocantins, Piauí, and Bahia as the spatial units of analysis.

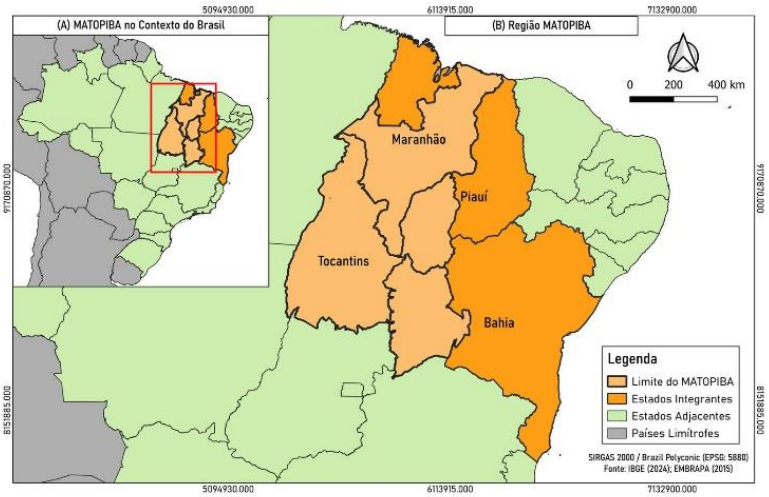


Figure 01: Location map of the study area, highlighting the integral states of Maranhão, Tocantins, Piauí, and Bahia, alongside the specific geographic boundary of the MATOPIBA agricultural frontier.
Source: Authors (2026), based on data from IBGE (2024) and EMBRAPA (2015).

This approach allows the capture of frontier expansion dynamics across the broader macro-region. The influence of the agricultural frontier is isolated using land-use and land-cover (LULC) classifications rather than a static geographical polygon. State and municipal boundary shapefiles were obtained from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) and used to spatially delimit the study area and perform aggregation procedures.

Burned area data were obtained from MapBiomas Fire Collection 4 (Projeto MapBiomas, 2024), which provides annual burned-area classifications derived from Landsat imagery at 30-meter spatial resolution for the period 1985–2024. The product detects burned pixels using spectral change detection and temporal filtering algorithms designed for tropical environments. Land use and land cover (LULC) classifications were obtained from MapBiomas Collection 10.1 (Projeto MapBiomas, 2024), allowing burned areas to be strategically associated with specific vegetation and anthropogenic land-use classes, thus serving as a proxy for agricultural frontier dynamics.

Each Landsat pixel represents 30 × 30 meters (900 m²), equivalent to 0.09 hectares (0.0009 km²). Burned area totals were calculated by counting burned pixels within each state boundary and converting pixel counts to square kilometers. Annual totals were computed separately for Bahia, Maranhão, Tocantins, and Piauí. Although MapBiomas Fire provides data from 1985 onward, the analysis was restricted to the 2000–2020 period. This temporal window was selected to ensure compatibility with the MODIS era of satellite observations, which begins in 2000, allowing comparability with MODIS-era observations (e.g., MCD64A1). Additionally, the selected interval represents the most intense phase of agricultural expansion in the region and reduces uncertainties associated with earlier Landsat coverage.

All data processing was conducted in Python within a Jupyter Notebook environment. Data preprocessing included standardization, filtering, and aggregation procedures. Data manipulation and aggregation were performed using the Pandas library, while visualization and time-series plotting were produced with matplotlib.

As evaluation tool, burned areas were grouped into two analytical proxies based on land-use class. The natural fire proxy was defined as burned areas occurring in native vegetation formations, specifically forest formations and savanna/shrubland formations (Vegetação Herbácea e Arbustiva). These vegetation types represent the natural fire-adapted ecosystems of the Cerrado, where fires are historically associated with seasonal drought and lightning ignition (Oliveira et al., 2005). The anthropogenic fire proxy corresponded to burned areas classified as Agropecuária (agriculture and pasture), typically linked to land clearing, crop residue burning, and pasture management practices common in agricultural frontiers. Annual time series were constructed for each state individually and for the aggregated four-state macro-region.

To quantify the functional transformation of fire, annual burned area totals were disaggregated by land-cover class to construct comparative time series for natural and anthropogenic proxies. This operational framework involved calculating the relative dominance and interannual variability of fire occurrence for each state and the aggregated four-state macro-region between 2000 and 2020. Structural changes were detected by analyzing the temporal trajectories of these proxies, enabling the identification of temporal shifts in the relative dominance of fire types. Line plots were generated to visualize temporal patterns and relative dominance between fire types, allowing the identification of regime shifts in the regional fire dynamics. This methodological framework represents a baseline reconstruction of fire regime structure based solely on Landsat-derived burned area observations. The integration of MODIS MCD64A1 burned-area products and CHIRPS precipitation data is proposed as a subsequent analytical phase to further investigate climate–fire relationships.

Results and Discussion

To understand the regional transformation of fire regimes, it is essential to analyze the individual dynamics of the four states that compose the MATOPIBA region: Maranhão, Tocantins, Piauí, and Bahia. Although these states are collectively recognized as a single agricultural frontier, they exhibit significant socio-environmental differences and varying stages of land-use intensification (Lima et al., 2019). By disaggregating the data at the state level, the results reveal a spatial gradient of frontier consolidation, allowing for the identification of where the anthropogenic decoupling of fire regimes is most advanced. This individual assessment provides the necessary resolution to observe how local management practices and land fragmentation interact with climatic variability across the macro-region (Segura-Garcia et al., 2025).

The state of Bahia presents the clearest evidence of this frontier consolidation phase, as illustrated in Figure 02. The temporal series shows that early years were characterized by significant burning in savanna formations, followed by a stabilization of fire occurrence in native vegetation and a gradual decrease in agricultural burning. This pattern indicates that initial fires were largely associated with vegetation clearing during the early stages of agricultural establishment (Pires et al., 2016). As the frontier consolidated and native vegetation became increasingly fragmented, fire recurrence shifted from landscape-scale ecological disturbances to field-scale management activities. This fragmentation reduces fuel continuity across the landscape, limiting fire spread and reducing the extent of natural fires (Oliveira et al., 2005).

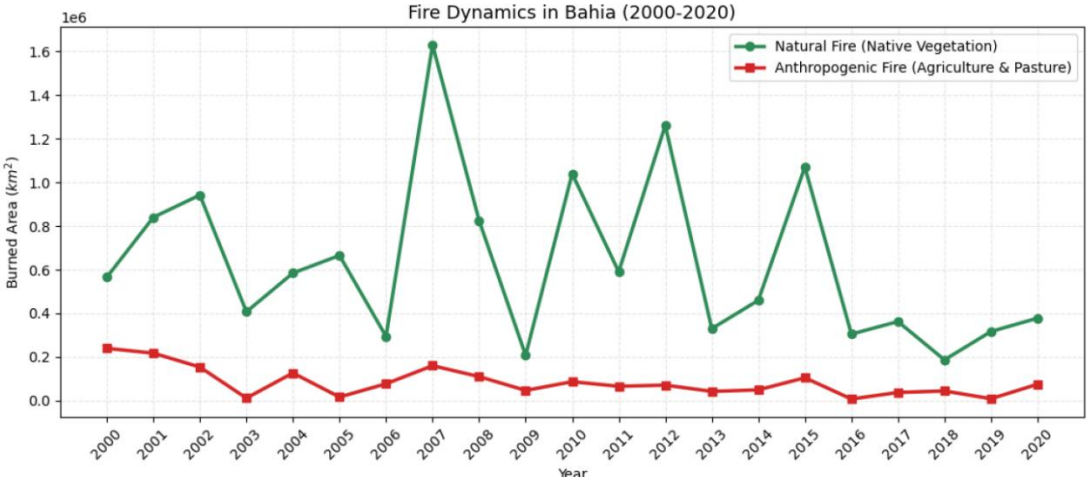


Figure 02: Fire dynamics in Bahia (2000-2020), highlighting the interaction between natural fire in native vegetation and anthropogenic fire in agricultural land-use classes.
Source: Authors (2026), based on MapBiomas Fire Collection 4 and LULC Collection 10.1.

Within this dynamic, the peaks observed in natural vegetation burning in 2007, 2012, and 2015 coincide with documented extreme climatic events. The peak in 2007 represents the highest occurrence of natural fire in the series, while the peaks in 2012 and 2015 occur during periods of severe meteorological drought. Specifically, the drought that began in 2012 is considered the most severe in several decades, persisting for five consecutive years and significantly altering rainfall patterns throughout the region (Brasil, 2016). During this period, air temperature anomalies reached values higher than 3°C, which accelerated fuel desiccation through increased evapotranspiration (Brasil, 2016). Furthermore, precipitation deficits frequently exceeded 100 mm in states such as Maranhão and Piauí, contributing to the extreme flammability of the Cerrado biomass (Brasil, 2016). The 2015 peak reflects the influence of a strong El Niño event, which, combined with record-high temperatures and lack of rainfall, exacerbated the drought conditions across the entire MATOPIBA macro-region (Brasil, 2016).

The Cerrado vegetation historically evolved under recurrent fires that maintained open physiognomies (Eiten, 1977). However, the data indicates that once land is converted into cropland, fire no longer predominantly performs an ecological regulatory role. Instead, fire occurrence becomes spatially constrained and temporally scheduled according to management decisions, such as land clearing or pasture renewal reducing its dependence on natural climatic seasonality (Tansey et al., 2004). This transition from climate-regulated to management-driven fire underscores the anthropogenic decoupling occurring in the region, where human intervention increasingly dictates fire patterns regardless of natural drought cycles.

Maranhão exhibits a distinct fire dynamic characterized by high interannual variability and a significantly higher baseline of anthropogenic fire compared to Bahia. As illustrated in Figure 03, the peaks in natural vegetation burning in 2007, 2012, and 2015 align with the regional climatic anomalies previously discussed, suggesting that natural fire regimes in Maranhão remain strongly coupled with extreme drought events. During the 2012–2016 "mega-drought," Maranhão faced significant precipitation deficits, which, combined with high solar radiation, amplified the flammability of its extensive savanna remnants (Brasil, 2016).

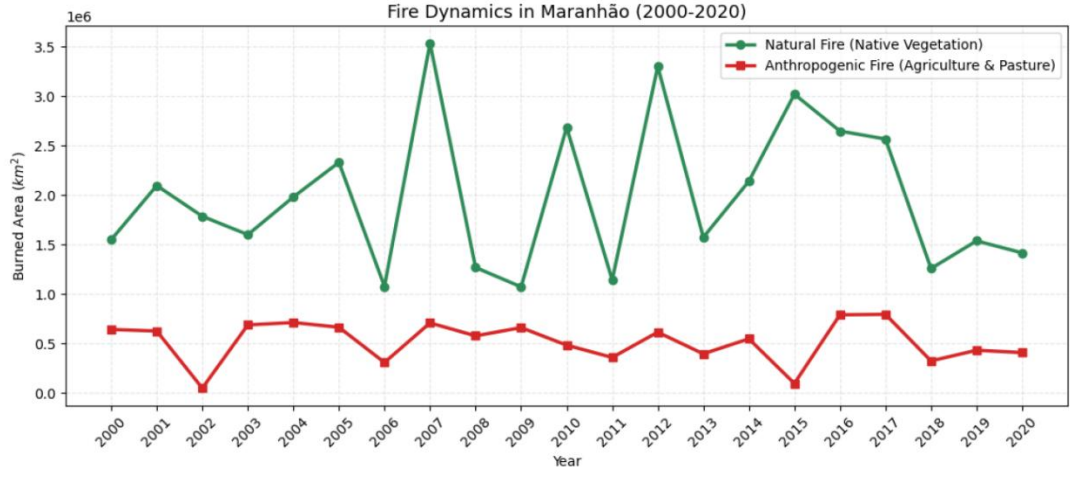


Figure 03: Fire dynamics in Maranhão (2000-2020), showing the high intensity of both natural and anthropogenic fire activities across the state.
Source: Authors (2026), based on MapBiomas Fire Collection 4 and LULC Collection 10.1.

However, the most striking feature of Maranhão's fire regime is the magnitude of the Anthropogenic Fire index. Unlike Bahia, where management-related burning remained relatively low, Maranhão shows consistent and high levels of fire occurrence in agricultural and pasture classes, often exceeding $0.6\times 10^6 km^2$. This indicates that Maranhão is currently in an active phase of frontier expansion, where fire is the primary tool not just for maintenance, but for the large-scale conversion of native landscapes into mechanized agriculture (Pires et al., 2016).

The elevated red line between 2016 and 2017 is particularly noteworthy, as it suggests a peak in land-use intensification immediately following the most severe years of the drought. In this state, the "anthropogenic decoupling" is less about the reduction of natural fire and more about the increasing dominance of human-driven ignitions that compete with natural cycles. The proximity of Maranhão to the Amazon-Cerrado transition zone likely contributes to higher biomass availability, which, when combined with aggressive land-conversion practices, results in the highest total burned area values among the MATOPIBA states (Lima et al., 2019).

In contrast to the consolidated agricultural mosaics of Bahia, the state of Tocantins retains the highest values of burned area in native vegetation throughout the study period, hosting the largest remaining fragments of Cerrado in Brazil (Patriota et al., 2017). As illustrated in Figure 04, the fire regime in this state is primarily driven by fuel continuity and landscape integrity, allowing fire to spread across vast undisturbed savanna remnants during drought years. This high connectivity explains why the magnitude of natural vegetation burning in Tocantins frequently exceeds $2.5 \times 10^6 km^2$ values significantly higher than those observed in other MATOPIBA states.

The temporal peaks in 2007, 2010, 2012, and 2017 indicate strong sensitivity to regional climatic variability. The year 2010 stands out as the highest occurrence of heat spots in the historical series, a period considered the most severe drought in the last century for the region (INMET, 2016; Patriota et al., 2017). During the 2015-2016 El Niño event, Tocantins was characterized as "extremely dry," facing atmospheric blocks that resulted in temperature anomalies up to 4°C above the average in the central portion of the state (INMET, 2016). These conditions accelerated fuel desiccation, amplifying the landscape-scale disturbance patterns observed in the green line of Figure 04.

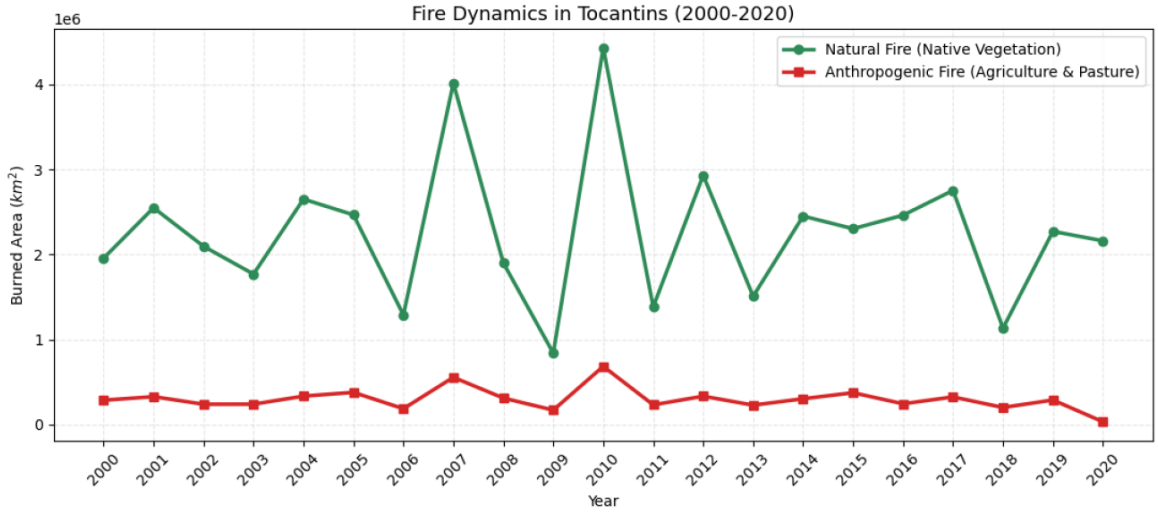


Figure 04: Fire dynamics in Tocantins (2000-2020), exhibiting the dominance of natural fire spread in continuous native vegetation landscapes.
Source: Authors (2026), based on MapBiomas Fire Collection 4 and LULC Collection 10.1.

Although the magnitude of Anthropogenic Fire (red line) remains lower than natural fire, its role as an ignition trigger is critical. Research indicates that approximately 62% of fire occurrences in Tocantins take place within rural properties, with "agricultural activities", such as land clearing and pasture renewal, identified as the primary cause of ignitions (Patriota et al., 2017). This suggests that while the large-scale spread is facilitated by natural fuel continuity, the fire regime is increasingly influenced by management practices. Tocantins thus serves as a baseline for the MATOPIBA region, illustrating that where landscape connectivity is preserved, climatic anomalies can trigger fire events of much greater magnitude than those occurring in fragmented, consolidated frontiers.

In contrast to the active frontier expansion observed in Maranhão, the state of Piauí exhibits a remarkably low and stable Anthropogenic Fire index (red line). Throughout the 2000–2020 series, management-driven fire consistently remains below $0.1 \times 10^6 km^2$ indicating that, while the agricultural sector is present, it has not yet reached the spatial dominance or the land-clearing intensity seen in other parts of the MATOPIBA region. This suggests that Piauí represents an earlier stage of frontier development, maintaining high landscape integrity, where large tracts of continuous native vegetation allow natural fire to propagate extensively, with a more prominent signal than human-driven ignitions.

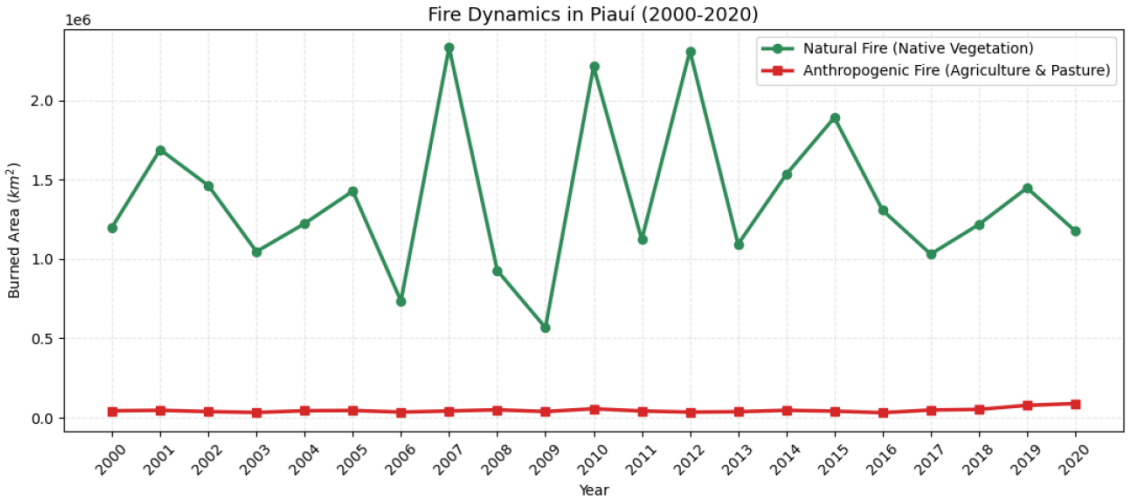


Figure 05: Fire dynamics in Piauí (2000-2020), showing the strong coupling between natural fire and climatic cycles alongside a stable anthropogenic fire baseline.
Source: Authors (2026), based on MapBiomas Fire Collection 4 and LULC Collection 10.1.

The divergence between the high-magnitude green line and the low red line in Piauí shows that the state is in an earlier stage of frontier transition compared to Bahia and Maranhão. In this context, the "anthropogenic decoupling" is not yet statistically dominant; the fire regime is still primarily regulated by ecological processes and moisture availability (Vicente-Serrano et al., 2010). Piauí thus serves as an important indicator for the macro-region, demonstrating that without the fragmentation caused by dense agricultural mosaics, natural fire patterns continue to respond directly and intensely to the pulses of the Cerrado climate.

The individual state dynamics collectively suggest that the MATOPIBA macro-region is undergoing a transition in fire regimes. As land conversion advances, fire occurrence progressively shifts from a climate-regulated ecological disturbance to a management-controlled process. In natural Cerrado systems, fire is historically coupled to climatic variability, where seasonal droughts and lightning facilitate widespread but low intensity burns that maintain open savanna physiognomies (Eiten, 1977; Ribeiro et al., 1981). However, as observed in consolidated frontiers like Bahia mechanized agriculture contributes to the decoupling of fire from natural seasonality, scheduling burns according to management decisions such as pasture renewal and residue removal (Giglio et al., 2018; Tansey et al., 2004)

Final Considerations

This study analyzed the fire regime dynamics of the MATOPIBA region between 2000 and 2020 using Landsat-derived burned-area data from MapBiomas Fire Collection 4. By aggregating burned area across Maranhão, Tocantins, Piauí, and Bahia and classifying fire occurrences into ecological (native vegetation) and anthropogenic (agricultural land use) proxies, we identified a shift in the role of fire within the Cerrado agricultural system.

The results indicate that MATOPIBA is not experiencing merely interannual variability in burned areas, but rather a progressive shift in fire drivers. In the early stages of the study period, fire occurrence was predominantly associated with native savanna and forest formations, consistent with a climate-regulated disturbance regime characteristic of the Cerrado biome. Over time, however, burned areas increasingly shifted toward agricultural land-use classes, indicating that fire is becoming increasingly management-driven rather than ecologically regulated.

State-level analyses reveal that this transition does not occur uniformly across the macro-region. Bahia exhibits characteristics of a consolidated system, where anthropogenic burning stabilizes while natural vegetation fire signals decline. Maranhão and Piauí exhibit mixed fire regimes, reflecting active and ongoing land conversion where human-driven ignitions interact with natural cycles. In contrast, Tocantins retains strong signals of landscape-scale ecological fire due to remaining large contiguous savanna areas, showing the highest burned area magnitudes during extreme climatic stress. The pronounced peaks observed in 2007, 2010, 2012, and 2015—corresponding to documented droughts and El Niño events—indicate that natural fire patterns remain important drivers in areas with high landscape connectivity.

In conclusion, the MATOPIBA macro-region is undergoing a significant transition in fire regimes, from an ecological disturbance system shaped by seasonal drought to a managed fire system embedded within mechanized agriculture. Understanding this transformation is critical for developing integrated fire management strategies, supporting biodiversity conservation, and improving land-use planning in the Brazilian Cerrado.

Bibliographic References

BORLAUG, N. E. Feeding a world of 10 billion people: The miracle ahead. In: BAILEY, R. (Ed.). **Global warming and other eco-myths**. [s.l.]: Competitive Enterprise Institute, 2002. p. 29–60.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia. **Situação da seca observada nas regiões Norte e Nordeste do Brasil em 2016**. Brasília, DF: INMET/CGMADP, 2016. Available at: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/combate-a-seca-1/arquivos-combate-a-seca/103.pdf. Accessed on: May 2, 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Informativo sobre a Estiagem no Nordeste**, no. 103. Brasília, DF: MAPA/SPA, Dec. 30, 2016.

DE ALMEIDA, et al. Biophysical features and climate stress in the Matopiba. **Journal of Arid Environments**, [s.l.], 2024.

EITEN, G. Delimitação do conceito de Cerrado. **Arquivos do Jardim Botânico do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, vol. 21, p. 125-134, 1977.

EMBRAPA TERRITORIAL. **GeoMatopiba**: Inteligência Territorial Estratégica para o Matopiba. Campinas, 2015. Disponível em: < www.embrapa.br/geomatopiba >. Accessed on: 3 mai. 2026
FUNDAÇÃO BIODIVERSITAS. **Lista da fauna brasileira ameaçada de extinção**. Belo Horizonte: Fundação Biodiversitas, 2005. Available at: http://www.biodiversitas.org.br.

FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations — a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, [s.l.], vol. 2, no. 150066, 2015.

GIGLIO, L. et al. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. **Remote Sensing of Environment**, [s.l.], vol. 217, p. 72-85, 2018.

HILTON-TAYLOR, C. **2004 IUCN Red List of threatened species**. Gland: IUCN – The World Conservation Union, 2004.
LIMA, M. et al. Demystifying sustainable soy in Brazil. **Land Use Policy**, [s.l.], vol. 82, p. 349-352, 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências: Downloads**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Available at: https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html. Accessed on: May 3, 2026.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, [s.l.], vol. 403, no. 6772, p. 853-858, 2000.

OLIVEIRA, R. S. et al. Deep root function in soil water dynamics in cerrado savannas of central Brazil. **Functional Ecology**, [s.l.], vol. 19, no. 4, p. 574-581, 2005.

PATRIOTA, J. N. et al. Avaliação das ocorrências de incêndios florestais no Estado do Tocantins. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, vol. 12, no. 3, p. 518-523, Jul./Sep. 2017.

PIRES, G. F. et al. Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: implications for land use in northern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s.l.], vol. 228-229, p. 286-298, 2016.

PROJETO MAPBIOMAS. **Plataforma MapBiomas - Coleção de Fogo (v. 4) e Cobertura e Uso da Terra (v. 10.1)**. 2024. Available at: https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/. Accessed on: May 2, 2026.

RIBEIRO, J. F.; SANO, S. M.; DA SILVA, J. A. Chave preliminar de identificação dos tipos fisionômicos da vegetação do Cerrado. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 32., 1981, Vitória. **Proceedings [...]**. Vitória: Sociedade Botânica do Brasil, 1981. p. 124-133.

SEGURA-GARCIA, C. et al. The fire regimes of the Cerrado and their changes through time. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, [s.l.], vol. 380, no. 1918, 2025.

SILVA, J. M. C.; BATES, J. M. Biogeographic patterns and conservation in the South American Cerrado: a tropical savanna hotspot. **BioScience**, [s.l.], vol. 52, no. 1, p. 225-233, 2002.

TANSEY, K. et al. Vegetation burning in the year 2000: global burned area estimates from SPOT VEGETATION data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s.l.], vol. 109, no. D14S03, 2004.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. **Journal of Climate**, [s.l.], vol. 23, no. 7, p. 1696-1718, 2010.

RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE TERRESTRE E ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO E ÁREAS URBANIZADAS EM REGIÃO DE CLIMA SEMIÁRIDO

1 Davi de Souza Ferreira, 2 Fabrissa Cotrim Pires, 3 Danyella Santos Silveira, 4 Magno Lucas Alcantara Silva, 5 Antonio Gabriel Rocha Silva, 6 Allandelon Silva Maciel, 7 Maria Laura Souza Silva, 8 Joseane Oliveira da Silva

1 Instituto Federal da Bahia, e-mail: dsferreira0705@gmail.com; 2 Instituto Federal da Bahia, e-mail: fahcotrim4@gmail.com; 3 Instituto Federal da Bahia, e-mail: danyella2024silveira@gmail.com; 4 Instituto Federal da Bahia, e-mail: lucasalcantara2501@gmail.com; 5 Instituto Federal da Bahia, e-mail: gabrielpessoa541@gmail.com; 6 Instituto Federal da Bahia, e-mail: allandelonmaciel45@gmail.com; 7 Instituto Federal da Bahia, e-mail: marialaura@ifba.edu.br; 8 Instituto Federal da Bahia, e-mail: joseaneos@ifba.edu.br

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; Ilhas de Calor; Planejamento Urbano.

Resumo

A urbanização em cidades do semiárido brasileiro tem intensificado alterações no balanço térmico superficial, favorecendo a formação de ilhas de calor urbanas. Este estudo analisou a relação entre a temperatura de superfície terrestre (LST), a cobertura vegetal (NDVI) e as áreas construídas (NDBI) no perímetro urbano de Guanambi, Bahia. Para isso, utilizaram-se imagens Landsat 8, adquiridas em 10 de agosto de 2025, com cobertura de nuvens inferior a 4%. O processamento foi realizado no QGIS 3.34.13, com estimativa térmica pela banda termal 10 e cálculo dos índices espectrais. A análise estatística baseou-se em 2.439 pontos amostrais regularmente distribuídos, aplicando-se correlação de Pearson e regressão linear simples. Os resultados indicaram distribuição térmica heterogênea, com temperaturas superiores a 37 °C em áreas periféricas de expansão urbana e maior impermeabilização superficial. Em contrapartida, setores vegetados e próximos a corpos hídricos apresentaram menores temperaturas, com diferenças de até 11,1 °C. A relação entre LST e NDVI foi praticamente nula (r = 0,077), sugerindo redução da capacidade mitigadora da vegetação durante o período seco. Por outro lado, observou-se associação positiva entre LST e NDBI (r = 0,28), evidenciando a influência das superfícies construídas no aquecimento local. Conclui-se que o uso e ocupação do solo exercem papel decisivo na dinâmica térmica urbana, reforçando a necessidade de planejamento voltado à ampliação da arborização e preservação de áreas verdes e sistemas hídricos.

Introdução

A expansão urbana, frequentemente associada ao aumento das áreas construídas e à redução da cobertura vegetal, inclusive em margens de cursos d'água, constitui fenômeno recorrente nas cidades brasileiras. No município de Guanambi, esse processo manifesta-se de forma expressiva, revelando transformações no tecido urbano ocorridas de maneira desarticulada em relação ao planejamento territorial e à oferta de infraestrutura básica. Soma-se a isso a ausência de diretrizes adequadas para a regularização de bairros, comprometendo o bem-estar socioambiental da população e refletindo-se diretamente na dinâmica de crescimento observada entre 2010 e 2019, período marcado pela intensificação da expansão das edificações na malha municipal (DIAS et al., 2024, p. 247).

As alterações na cobertura do solo registradas no município favorecem processos de impermeabilização por materiais construtivos que interferem no balanço térmico e reduzem as condições de conforto ambiental. Conforme Amorim (2019, p. 15), a variabilidade das temperaturas superficiais em áreas urbanas e rurais relaciona-se às formas de ocupação do solo, aos materiais empregados, ao grau de impermeabilização, à densidade construtiva e à presença de vegetação. Além disso, eventos térmicos extremos ampliam a vulnerabilidade social, reforçando a necessidade de políticas públicas e habitações adaptadas às condições climáticas locais.

Nesse contexto, Barbosa e Vecchia (2009, p. 273) definem a Ilha de Calor Urbana como a elevação das temperaturas em determinados setores da cidade. Sua investigação pode ser realizada por meio do sensoriamento remoto no infravermelho termal, técnica que permite analisar o comportamento térmico das coberturas terrestres a partir da temperatura de superfície terrestre (Land Surface Temperature – LST) (BARBOSA; VECCHIA, 2009, p. 274).

Além disso, índices radiométricos como o NDBI (Índice de Diferença Normalizada de Áreas Construídas) e o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) apresentam elevada aplicabilidade na compreensão das relações entre anomalias térmicas e características da superfície. Esses indicadores permitem realçar feições e distinguir diferentes alvos, como áreas edificadas e vegetadas, contribuindo para interpretações mais precisas da dinâmica térmica espacial (MOREIRA; AMORIM, 2015, n.p.).

Desse modo, o Sistema de Informação Geográfica (SIG) configura-se como importante instrumento de apoio ao planejamento territorial, ao integrar análises climáticas e informações espaciais voltadas à melhoria da qualidade ambiental urbana. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo analisar a relação entre a temperatura de superfície terrestre (LST) e os índices espectrais NDVI e NDBI no perímetro urbano de Guanambi, Bahia, buscando compreender os efeitos do uso e ocupação do solo sobre a dinâmica térmica local.

Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido no município de Guanambi, localizado no sudoeste do estado da Bahia, em região classificada climaticamente como Semiárida (BSh), segundo a classificação de Köppen (1936). A delimitação da área de estudo foi realizada a partir de arquivo *shapefile* disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), referente às áreas urbanizadas. Conforme o balanço hídrico climatológico oficial (SEI, 2024), a região apresenta elevadas temperaturas, com média anual de 25,9 °C, variando de 23,6 °C no inverno a picos médios de 27,6 °C na primavera. O regime pluviométrico é escasso, com um acumulado médio anual de 599,3 mm, concentrado predominantemente entre novembro e janeiro. No tocante à umidade relativa do ar, estudos agrometeorológicos locais apontam que o município apresenta variações médias entre 37,8% e 68,3%, com os menores índices registrados justamente durante o prolongado período seco que afeta a região (CAPORALE, 2017). Essa deficiência hídrica constante e o ar seco favorecem a intensificação dos processos térmicos na superfície terrestre, especialmente nas áreas urbanizadas de maior influência antrópica.

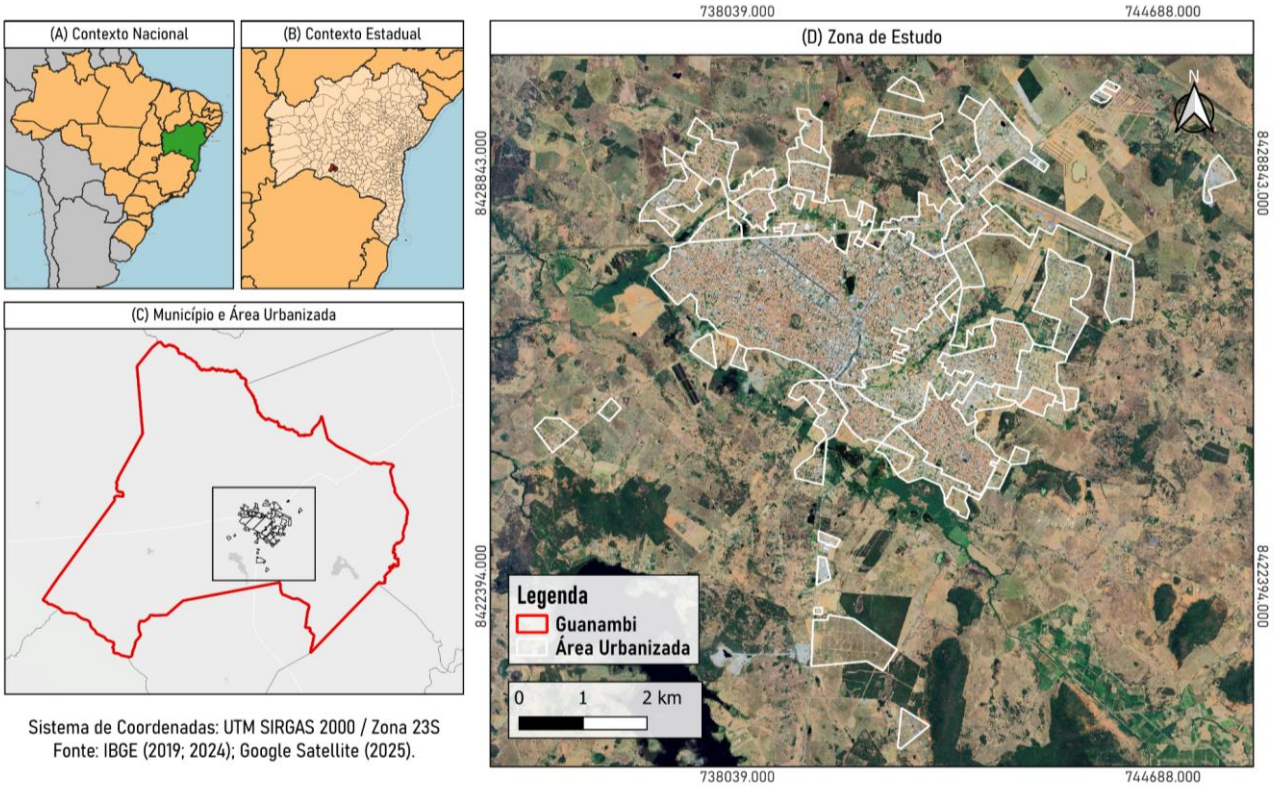


Figura 01: Mapa de localização da área de estudo.
Fonte: Autores (2026)

Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8, provenientes dos sensores Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS), obtidas gratuitamente junto ao United States Geological Survey (USGS). A cena selecionada corresponde à data de 10/08/2025, com horário de aquisição às 12:55:47 UTC, equivalente a aproximadamente 09:55 no horário local (UTC-3). A escolha da imagem considerou cobertura de nuvens inferior a 4%, visando maior confiabilidade dos dados. A análise foi realizada a partir de cena representativa do período seco regional.

Inicialmente, procedeu-se ao recorte da cena com base no limite da área urbanizada, seguido do processamento das bandas necessárias à obtenção da temperatura de superfície e dos índices espectrais. Todo o processamento foi conduzido em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando o software QGIS versão 3.34.13, por meio de operações matriciais.

A estimativa da temperatura de superfície terrestre foi realizada a partir da banda termal 10 do sensor TIRS/Landsat 8, conforme metodologia proposta por Coelho e Corrêa (2013). O procedimento envolveu a conversão dos valores de número digital (DN) em radiância espectral, expressa pela Equação (01):

$$L_\lambda = ML \cdot Qcal + AL \qquad (01)$$

em que L_λ representa a radiância espectral ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$), ML corresponde ao fator multiplicativo de reescalonamento, ALao fator aditivo e $Qcal$ ao valor quantizado do pixel (DN).

Em seguida, a radiância espectral foi convertida em temperatura de brilho em Kelvin, utilizando as constantes de calibração térmica, de acordo com a Equação (02):

$$T_K = \frac{K2}{ln(\frac{K1}{L_\lambda}+1)} \qquad (02)$$

onde T_K é a temperatura em Kelvin, $K1$ e $K2$ são constantes de calibração fornecidas nos metadados da imagem. Posteriormente, os valores foram convertidos para graus Celsius por meio da Equação (03) :

$$T_C = T_K - 273.15 \qquad (03)$$

Esse conjunto de procedimentos permite a obtenção da temperatura radiante da superfície, representando a energia emitida pelos diferentes alvos terrestres no infravermelho termal.

Para a análise da cobertura do solo, foram calculados índices espectrais amplamente utilizados na literatura. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi obtido a partir das bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED), conforme a Equação (04):

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \qquad (04)$$

Valores mais elevados de NDVI indicam maior presença e densidade de cobertura vegetal. O Índice de Áreas Construídas por Diferença Normalizada (NDBI) foi calculado com base nas bandas do infravermelho médio (SWIR) e do infravermelho próximo (NIR), utilizando a Equação (05). Valores positivos de NDBI tendem a indicar superfícies construídas e impermeáveis.

$$NDBI = \frac{(SWIR - NIR)}{(SWIR + NIR)} \qquad (05)$$

A análise estatística foi baseada em amostragem espacial sistemática, mediante distribuição regular de pontos sobre a área urbana. Para isso, foram gerados 2.439 pontos com espaçamento de 100 metros, assegurando uma representação homogênea do território. Em seguida, utilizou-se a ferramenta "Amostra de Valores Raster" para extrair, em cada ponto, os valores correspondentes de temperatura de superfície, NDVI e NDBI.

Os dados obtidos foram organizados em formato tabular e exportados para o Google Planilhas, onde foram conduzidas as análises estatísticas. Em razão do elevado tamanho amostral (n = 2.439), empregou-se o coeficiente de correlação de Pearson para avaliar a associação linear entre as variáveis (Equação 06).

$$r = \frac{\sum (x_i - \underline{x})(y_i - \underline{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \underline{x})^2 \cdot \sum (y_i - \underline{y})^2}} \qquad (06)$$

em que r representa o coeficiente de correlação, e x_i e y_i correspondem aos valores das variáveis analisadas e $\underline{x}$ e $\underline{y}$ suas respectivas médias.

Adicionalmente, aplicou-se a regressão linear simples para modelar a relação entre as variáveis, segundo a Equação (07):

$$y = a + xb \qquad (07)$$

em que y representa a temperatura de superfície, x corresponde aos índices espectrais (NDVI ou NDBI), a é o intercepto e b o coeficiente angular.

Resultados e Discussão

A distribuição espacial da Temperatura de Superfície Terrestre (LST) na malha urbana de Guanambi revelou um gradiente térmico heterogêneo, no qual as variações de calor refletem diretamente os diferentes padrões de uso e ocupação do solo, bem como a densidade construtiva. Os núcleos de maior aquecimento, com registros superiores a 37°C, concentraram-se predominantemente em setores de expansão urbana e distritos periféricos como Jardim Aeroporto, Cidade Nova, Boa Vista, Maria Fátima, Manoel Cotrim e Loteamento Renascer II, além de áreas adjacentes à Lagoa do Coqueiro. Nessas localidades, observou-se associação entre elevados valores do Índice de Áreas Construídas (NDBI) e a supressão quase total do vigor vegetativo (NDVI < 0,1). Esta configuração corrobora a hipótese de que a substituição de superfícies naturais por materiais de alta capacidade térmica e baixa refletividade, como o asfalto e o concreto, catalisa o fenômeno das Ilhas de Calor Urbana (ICU), elevando a temperatura de superfície em detrimento do conforto térmico ambiental (AMORIM, 2019).

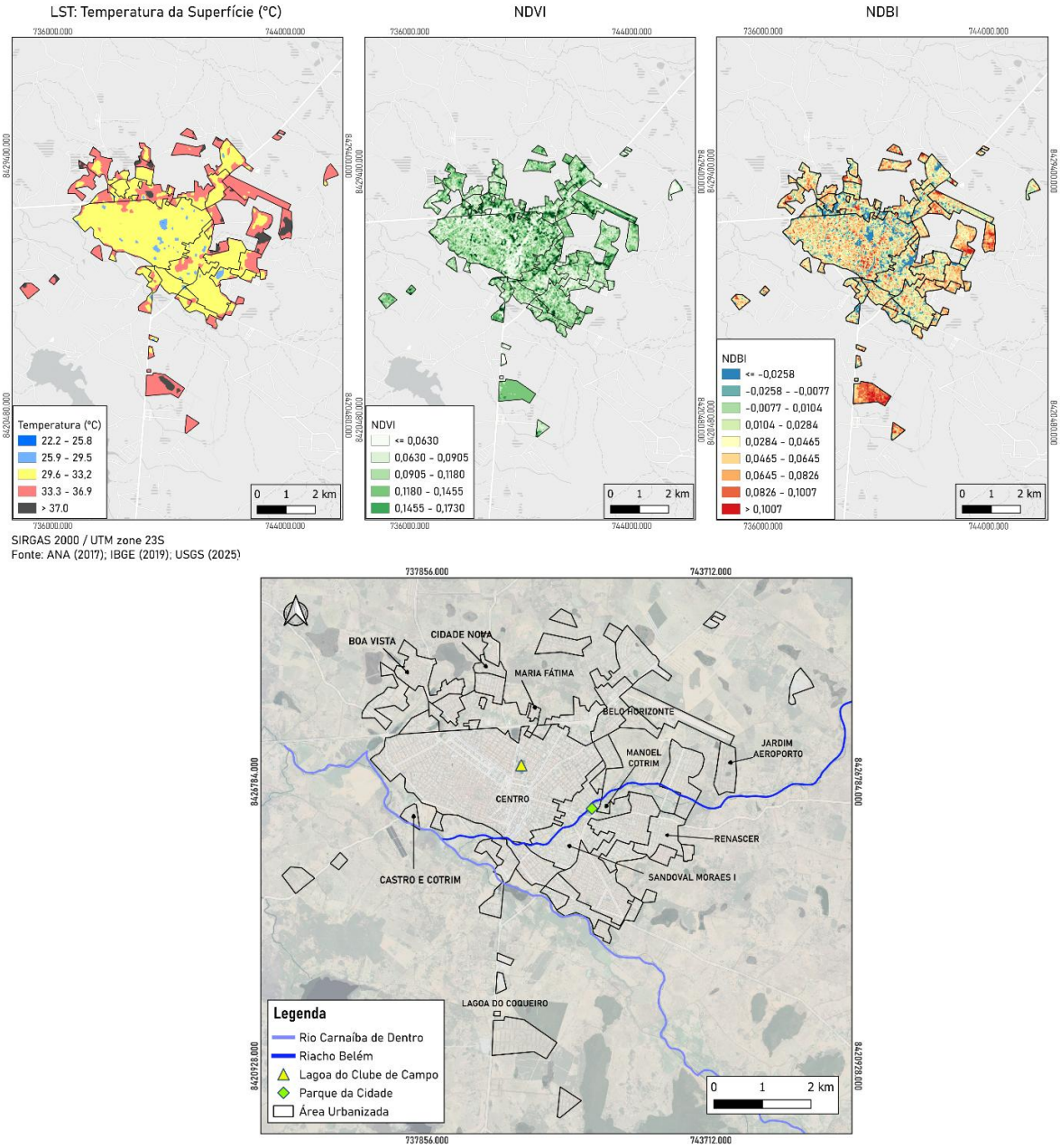


Figura 02: Dinâmica espacial da LST, NDVI e NDBI na área de estudo.
Fonte: Autores (2026)

Adjacentes a esses núcleos críticos, faixas de aquecimento moderado (33,3°C a 36,9°C) estenderam-se pela Área Industrial e bairros consolidados como Belo Horizonte, Castro e Cotrim e Sandoval Moraes I. Embora o adensamento construtivo seja evidente, a presença de lotes vagos com alguma umidade residual ou vegetação herbácea esparsa atua como um fator de atenuação térmica parcial. Diferentemente do esperado para áreas com elevada impermeabilização, a região central de Guanambi apresentou patamares térmicos intermediários (29,6°C - 33,2°C), mesmo concentrando os maiores índices de adensamento (NDBI entre 0,08 e 0,10). Esse comportamento pode estar relacionado pela configuração dos cânions urbanos, onde a geometria das edificações promove o sombreamento mútuo das superfícies e das vias públicas durante os períodos de maior irradiância. Conforme apontado por Oke et al. (2017), em áreas urbanas densas, a razão entre a altura dos edifícios e a largura das ruas (razão H/W) é um determinante primário no balanço de radiação, permitindo que as massas construídas interceptem a radiação solar direta antes que esta atinja o plano do solo. Esse efeito de sombreamento, aliado à inércia térmica dos materiais, atua como um regulador da temperatura de superfície, retardando o ganho de calor excessivo no nível do solo e justificando os valores moderados encontrados nesta zona consolidada.

Em contraste, as zonas de resfriamento mais expressivas (25,9°C a 29°C) desempenharam importante função de serviços ecossistêmicos reguladores. Localidades como o entorno da Lagoa do Clube de Campo, o Parque da Cidade e as margens do Riacho Belém registraram os maiores valores de NDVI. Conforme demonstram Mendonça, Sales e Sales (2022, p. 3093), o vigor

vegetativo atua diretamente no balanço de energia urbana, de modo que "as áreas vegetadas apresentaram um maior fluxo de calor latente e menor fluxo de calor do solo", mitigando o aquecimento da superfície. Os dados locais corroboram essa dinâmica, revelando que as áreas preservadas conseguiram manter a temperatura superficial até 11,1°C mais baixa em comparação aos picos extremos (superiores a 37°C) registrados nos bairros impermeabilizados.

No entanto, quando analisada a malha urbana em sua totalidade, a relação estatística entre a temperatura de superfície (LST) e o índice de vegetação (NDVI) apresentou uma correlação praticamente nula (r = 0,077) e um R^2 próximo de zero (0,006). Longe de ser uma contradição frente aos refúgios térmicos supracitados, este resultado evidencia o comportamento termodinâmico típico do ecossistema semiárido no período de estiagem. Nessas condições, a vegetação sofre intenso estresse hídrico, o que reduz sua atividade fotossintética e sua capacidade de evapotranspiração. Consequentemente, há aumento da reflectância na faixa do visível e redução no infravermelho próximo, resultando em menores valores de NDVI e em uma resposta térmica mais próxima à de superfícies expostas (OLIVEIRA et al., 2021).

Esse processo contribui para maior homogeneização térmica da paisagem urbana, evidenciando que, durante a estação seca, a vegetação não irrigada reduz significativamente sua capacidade de amenização térmica. Nesse contexto, destaca-se o "efeito oásis" das infraestruturas azuis em Guanambi, uma vez que a presença de corpos d'água perenes passa a exercer papel central na regulação microclimática local.

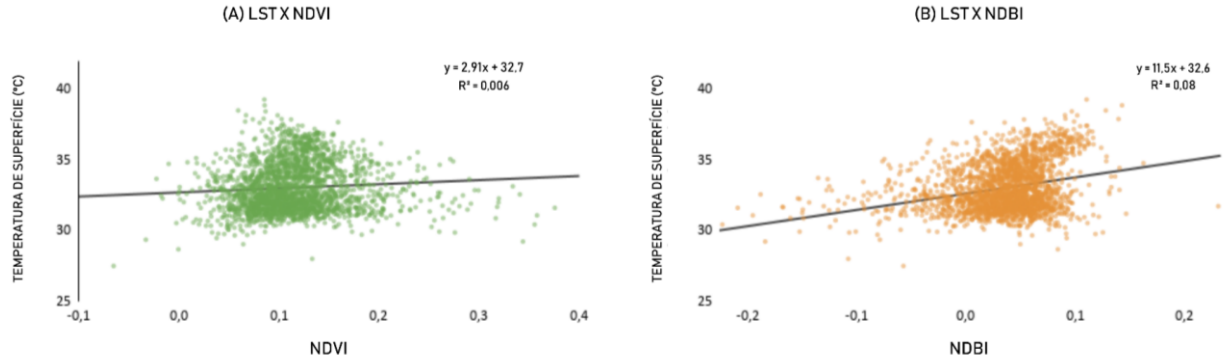


Figura 03: Relação entre a Temperatura de Superfície (LST) e os índices NDVI (A) e NDBI (B).
Fonte: Autores (2026)

Em complemento a essa dinâmica, a análise estatística revelou influência positiva das áreas impermeabilizadas sobre o aquecimento urbano. Ao correlacionar a LST com o índice de edificação (NDBI), obteve-se um coeficiente angular de 11,5, o que demonstra que pequenos acréscimos na densidade construída provocam saltos térmicos consideráveis. O coeficiente de determinação (R^2 = 0,08) e a correlação de Pearson (r = 0,28) indicam uma associação positiva. Embora o valor matemático de R^2 pareça modesto de forma isolada, estudos utilizando o satélite Landsat 8 (KAPLAN; AVDAN; AVDAN, 2018) corroboram que a associação direta entre o NDBI e a elevação térmica é uma evidência clara de que os materiais construtivos atuam como catalisadores para a formação e intensificação das ilhas de calor urbanas.

Nos últimos anos, a cidade tem apresentado um intenso processo de crescimento horizontal, majoritariamente pautado pela especulação imobiliária. Observa-se que a implantação de novos loteamentos, a exemplo do Loteamento Renascer e de bairros periféricos de expansão, ocorre sob a premissa da remoção drástica da vegetação nativa da Caatinga para a inserção de infraestrutura básica. Nesses vetores de expansão, a substituição do solo natural por extensas superfícies impermeáveis de asfalto, calçadas cimentadas e telhados de cerâmica ou fibrocimento gera zonas com elevado albedo e alta capacidade de retenção térmica. A carência histórica de árvores nas vias públicas intensifica esse quadro, ampliando a exposição das superfícies urbanas à radiação solar e favorecendo a formação de Ilhas de Calor severas. Tal contexto acompanha os resultados de Cobertura vegetal e arborização urbana em Guanambi, segundo os quais mais de 80% dos loteamentos de Guanambi foram classificados em situação insatisfatória ou inadequada quanto à presença de áreas verdes, enquanto nenhum empreendimento alcançou padrões considerados satisfatórios de acordo com referências nacionais e internacionais de qualidade ambiental urbana (CLEMENTE et al., 2019).

A capacidade de mitigação térmica dos sistemas hídricos urbanos também se encontra ameaçada pelo modelo de urbanização desordenada, tendo o Riacho Belém e o Rio Carnaíba de Dentro como exemplos representativos desse processo. Apesar do potencial natural desses canais para funcionarem como corredores ecológicos e áreas de amenização térmica, sua eficiência microclimática foi fortemente reduzida nas porções urbanizadas em razão da intensa ocupação de margens e leitos. De acordo com Clemente et al. (2025), entre 2008 e 2019 ocorreu expressivo avanço de edificações sobre as Áreas de Preservação Permanente (APPs) associadas a esses cursos d'água, com crescimento direcionado principalmente para o setor leste-sudeste do município, somando-se a ocupações irregulares já consolidadas anteriormente. Esse quadro favoreceu a remoção de parcelas significativas da vegetação ciliar, comprometendo funções essenciais como sombreamento, manutenção da umidade e circulação de ar mais fresco. Sem essa proteção natural, tais sistemas hídricos deixam de exercer plenamente seu papel regulador e passam a reforçar a lógica da impermeabilização urbana, evidenciando que, em Guanambi, o agravamento do desconforto térmico está diretamente associado às fragilidades do zoneamento ambiental e à negligência na preservação das bacias hidrográficas.

Considerações Finais

O presente estudo analisou a relação entre a temperatura de superfície terrestre (LST) e os índices espectrais NDVI e NDBI no perímetro urbano de Guanambi, evidenciando a influência do uso e ocupação do solo sobre a dinâmica térmica em contexto semiárido.

Verificou-se que os maiores valores térmicos concentraram-se, principalmente, em setores de expansão urbana e locais com elevada impermeabilização, enquanto espaços vegetados e ambientes próximos a corpos hídricos registraram condições mais amenas, confirmando sua relevância para a regulação microclimática local.

No conjunto da malha urbana, a associação entre LST e NDVI mostrou-se baixa, sugerindo redução da capacidade mitigadora da vegetação durante o período seco, em razão do estresse hídrico característico do semiárido. Em sentido oposto, observou-se relação positiva entre LST e NDBI, indicando a contribuição das superfícies construídas para o aquecimento local.

Diante desse cenário, torna-se necessário fortalecer o planejamento municipal, especialmente por meio da revisão e efetiva implementação do Plano Diretor, incorporando diretrizes voltadas à ampliação da arborização, criação e manutenção de áreas verdes, proteção de sistemas hídricos e ordenamento da expansão horizontal. Tais medidas são essenciais para reduzir vulnerabilidades socioambientais e promover melhores condições de conforto térmico à população.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017 (BHO 2017)**. Brasília, DF: ANA, 2017. Base cartográfica digital (shapefile). Disponível em: https://dadosabertos.ana.gov.br/. Acesso em: 15 abr. 2026.

AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. ILHAS DE CALOR URBANAS: MÉTODOS E TÉCNICAS DE ANÁLISE. **Revista Brasileira de Climatologia,** [S. l.], 2019. DOI: 10.5380/abclima.v0i0.65136. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/65136. Acesso em: 05 abr. 2026.

AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. ILHAS DE CALOR SUPERFICIAIS: FREQUÊNCIA DA INTENSIDADE E VARIABILIDADE ESPACIAL EM CIDADE DE CLIMA TROPICAL CONTINENTAL. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, n. 34, p. e40959, 2019. DOI: 10.12957/geouerj.2019.40959. Disponível em: https://www.e-publicacoes.uerj.br/geouerj/article/view/40959. Acesso em: 25 abr. 2026.

BARBOSA, Ricardo Victor Rodrigues e VECCHIA, Francisco Arthur da Silva. Estudos de ilha de calor urbana por meio de imagens do Landsat 7 ETM+: estudo de caso em São Carlos (SP). **Revista Minerva**, v. 6, n. 3, p. 273-278, 2009Tradução . . Disponível em: http://www.fipai.org.br/Minerva%2006(03)%2007.pdf. Acesso em: 25 abr. 2026.

CAPORALE, Angel Ricardo. **Desenvolvimento e avaliação de uma ferramenta para manejo de irrigação**. 2017. Dissertação (Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, Guanambi, 2017.

CLEMENTE, Carlos Magno Santos; PEREIRA, Deborah Marques; MAGALHÃES, Hellen Pereira Cotrim; ARAÚJO, Caroline Gonçalves. COBERTURA VEGETAL E QUALIDADE DE VIDA: CIDADE DE GUANAMBI, SEMIÁRIDO BAIANO. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 20, n. 72, p. 136–148, 2019. DOI: 10.14393/RCG207242583. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/42583. Acesso em: 27 abr. 2026.

CLEMENTE, Carlos Magno Santos; CLEMENTE, Deborah Marques Pereira; DIAS, Felipe Teixeira; LEITE, Marcos Esdras. URBANIZAÇÃO EM ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE DE CURSO D'ÁGUA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: O CASO DA CIDADE DE GUANAMBI/BA (2008 E 2019). **Geoambiente On-line**, Goiânia, n. 51, 2025. Disponível em: https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/view/76950. Acesso em: 27 abr. 2026.

COELHO, André Luiz Nascentes; CORREA, Wesley de Souza Campos. Temperatura de superfície Celsius do sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações. **Revista Geográfica Acadêmica**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 31–45, 2013. DOI: 10.18227/1678-7226rga.v7i1.2996. Disponível em: https://revista.ufrr.br/rga/article/view/2996. Acesso em: 25 mar. 2026.

DIAS, Felipe Teixeira; CLEMENTE, Carlos Magno Santos; PEREIRA, Deborah Marques; LEITE, Marcos Esdras. DESENVOLVIMENTO, CRESCIMENTO OU EXPANSÃO URBANA? : IMPLICAÇÕES SOCIOESPACIAIS DO AUMENTO DE EDIFICAÇÕES EM UMA CIDADE DE PEQUENO-MÉDIO PORTE. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 34, n. 76, p. 237, 2024. DOI: 10.5752/P.2318-2962.2024v34n76p237. Disponível em: https://periodicos.pucminas.br/geografia/article/view/30117. Acesso em: 25 abr. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Áreas urbanizadas: base cartográfica digital**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/redes-geograficas/15789-areas-urbanizadas.html. Acesso em: 25 mar. 2026.

KAPLAN, Gordana; AVDAN, Ugur; AVDAN, Zehra Yigit. Urban heat island analysis using the Landsat 8 satellite data: a case study in Skopje, Macedonia. **Proceedings**, v. 2, n. 7, p. 358, 2018. Disponível em: https://www.mdpi.com/2504-3900/2/7/358. Acesso em: 07 abr. 2026.

KÖPPEN, Wladimir. Das geographische System der Klimate. *In*: KÖPPEN, Wladimir; GEIGER, Rudolf (ed.). **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1936. v. 1, parte C, p. 1-44.

MENDONÇA, José Carlos; SALES, Renata Silva Barreto; SALES, Dhiego da Silva. Balanço de Energia no perímetro urbano de Campos dos Goytacazes, RJ: Um estudo de caso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 15, n. 6, p. 3093–3105, 2022. DOI: 10.26848/rbgf.v15.6.p3093-3105. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/254364. Acesso em: 06 abr. 2026.

MOREIRA, Janaína Lopes; AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. O clima urbano de Penápolis, São Paulo, através da temperatura da superfície e de índices radiométricos. **Geosaberes**, Fortaleza, v. 3, pág. 190 - 202, julho de 2015. ISSN 2178-0463. Disponível em: http://www.geosaberes.ufc.br/geosaberes/article/view/468. Acesso em: 25 abr. 2026.

OKE, Timothy Richard; MILLS, Gerald; CHRISTEN, Andreas; VOOGT, James Andrew. **Urban climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

OLIVEIRA, Verônica Gabriella de; SILVA, Madson Tavares; SANTOS, Carlos Antonio Costa dos; SERRÃO, Edivaldo Afonso de Oliveira; SILVA, Bruce Kelly da Nobrega; SANTOS, Marcos Ronielly da Silva; CORRÊA, Irene Cristina Pereira. Variabilidade temporal da cobertura das terras nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S. l.], v. 36, n. 1, p. 125–136, 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863610011. Disponível em: https://rbmet.org.br. Acesso em: 06 abr. 2026.

SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. **Balanço hídrico climatológico do Estado da Bahia (1990-2020)**. Salvador: SEI, 2024. (Série Estudos e Pesquisas, 108). Disponível em: https://www.ba.gov.br/sei/sites/site-sei/files/migracao_2024/arquivos/images/publicacoes/download/sep/sep_108.pdf. Acesso em: 28 abr. 2026.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Landsat 8 OLI/TIRS Level-2 Data Products**. Reston, VA: USGS, 2025. Disponível em: https://earthexplorer.usgs.gov/. Acesso em: 15 mar. 2026.

ESTIMATIVA DA PERDA ANUAL DE SOLO POR EROSÃO HÍDRICA NA BACIA DO IGARAPÉ SANTOS, TUCURUÍ, PARÁ

1 Alyson Gabriel Carneiro Camelo, 2 Carlos Eduardo Wanseler Gonçalves, 3 Caroline Queiroz de Almeida, 4 Fernando Oliveira da Silva, 5 Thafiny Louriele Oliveira de Souza, 6 Fernando Alves Barros Firmino

1 IFPA, e-mail: alysongabriel9457@gmail.com; 2 IFPA, e-mail: carlosedupp10@gmail.com; 3 IFPA, e-mail: carolineqalmeida@gmail.com; 4 IFPA, e-mail: fs1998204@gmail.com; 5 IFPA, e-mail: thafinyoliveira745@gmail.com; 6 IFPA, e-mail:. nando.firmino@ifpa.edu.br

Palavras-chave: Erosão hídrica; Geoprocessamento; USLE.

Resumo

A erosão hídrica constitui um dos principais processos de degradação ambiental em bacias hidrográficas, especialmente em áreas tropicais úmidas submetidas à elevada intensidade pluviométrica, alterações no uso da terra e exposição do solo. Este trabalho teve como objetivo estimar a perda anual de solo na bacia hidrográfica do Igarapé Santos, localizada no Município de Tucuruí, Pará, por meio da Equação Universal de Perdas de Solo, em ambiente de Sistema de Informação Geográfica. Foram integrados os fatores de erosividade da chuva, erodibilidade do solo, fator topográfico, uso e manejo do solo e práticas conservacionistas. A erosividade da chuva foi obtida a partir de estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, com apoio do plugin ANA Data Acquisition no QGIS. A erodibilidade foi gerada com base na camada vetorial de pedologia do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. O fator topográfico foi calculado a partir da imagem ALOS PALSAR AP_27277_FBS_F7110_RT1, enquanto o uso e cobertura do solo foi obtido pelo Projeto TerraClass 2022. Os resultados indicaram predomínio das classes nula ou ligeira de perda de solo, correspondendo a 88,64% da área analisada. As classes moderada, alta e muito alta representaram, respectivamente, 8,89%, 2,44% e 0,03% da bacia. Embora a maior parte da área apresente baixo potencial de perda de solo, os setores classificados como alta e muito alta perda devem ser considerados prioritários para ações de controle do escoamento superficial, recomposição vegetal e planejamento do uso da terra.

Introdução

A erosão hídrica é um processo natural de desagregação, transporte e deposição de partículas do solo, porém sua intensificação está fortemente relacionada à remoção da cobertura vegetal, ao manejo inadequado do solo, à concentração do escoamento superficial e à ocupação desordenada do território. Em bacias hidrográficas, esse processo pode provocar perda de fertilidade, assoreamento de cursos d'água, alteração da qualidade da água e redução da capacidade de suporte ambiental da paisagem. Em áreas urbanas e periurbanas da Amazônia, a erosão pode ainda comprometer vias, moradias, margens de igarapés e infraestruturas públicas, tornando-se uma questão ambiental e também de planejamento territorial.

O Município de Tucuruí está localizado no estado do Pará e possui área territorial de 2.084,276 km² e população de 91.306 habitantes no Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2025). A bacia do Igarapé Santos insere-se nesse contexto regional, marcado por clima úmido, presença de drenagens de pequeno porte, áreas de ocupação antrópica e distintos padrões de cobertura do solo. A análise da perda de solo nessa bacia permite compreender a distribuição espacial das áreas mais vulneráveis e subsidiar ações de manejo, conservação e ordenamento do território.

A Equação Universal de Perdas de Solo, proposta por Wischmeier e Smith (1978), é um dos modelos empíricos mais utilizados para estimar perdas médias anuais de solo por erosão laminar. O modelo considera a interação entre erosividade da chuva, erodibilidade do solo, topografia, cobertura e manejo da terra e práticas conservacionistas. Em ambiente SIG, a aplicação da EUPS permite espacializar os fatores e produzir cartas temáticas que indicam os setores com maior potencial de perda de solo.

A utilização de geotecnologias amplia a capacidade de análise da erosão hídrica, pois permite integrar bases de diferentes origens, como modelos digitais de elevação, mapas pedológicos, dados pluviométricos e produtos de uso e cobertura do solo. Essa integração é especialmente relevante em áreas onde a disponibilidade de medições de campo é limitada, uma vez que possibilita uma primeira aproximação espacial das áreas críticas e orienta a priorização de levantamentos posteriores.

Assim, este trabalho teve como objetivo elaborar a Carta de Estimativa de Perda Anual de Solo da bacia do Igarapé Santos, no Município de Tucuruí, a partir da integração de bases geoespaciais oficiais, dados hidrológicos e produtos de sensoriamento remoto, visando subsidiar o planejamento ambiental e a identificação de áreas prioritárias para ações conservacionistas.

Material e Métodos

A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do Igarapé Santos, situada no Município de Tucuruí, no sudeste do Pará. O processamento foi realizado em ambiente SIG, utilizando o software QGIS, com a integração de dados vetoriais e matriciais relacionados aos fatores da Equação Universal de Perdas de Solo. A estimativa da perda anual de solo foi realizada pela equação $A = R \times K \times LS \times C \times P$, em que A representa a perda média anual de solo, R a erosividade da chuva, K a erodibilidade do solo, LS o fator topográfico, C o fator de uso e manejo do solo e P o fator de práticas conservacionistas (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

A delimitação da Bacia Hidrográfica do Igarapé Santos foi realizada no QGIS, a partir do MDE derivado da imagem ALOS PALSAR. O raster foi recortado para a área de interesse, reprojetado para SIRGAS 2000 / UTM Zona 22S e corrigido

quanto à presença de pixels sem dados. Em seguida, foram gerados os mapas de direção e acumulação de fluxo. A bacia foi delimitada a partir do ponto de exutório, localizado na foz do Igarapé Santos, utilizando a ferramenta r.water.outlet, que gera a área de contribuição a montante de um ponto definido pelo usuário (GRASS DEVELOPMENT TEAM, 2025). Após a delimitação, o raster da bacia foi convertido para vetor, servindo como limite para o recorte dos demais fatores da EUPS/USLE.

O fator R foi obtido com base em séries pluviométricas disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Para a aquisição dos dados foi utilizado o plugin ANA Data Acquisition, desenvolvido pelo grupo Hidrologia de Grande Escala, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A ferramenta permite o download automático de dados de estações pluviométricas e fluviométricas da ANA, além de possibilitar a seleção espacial das estações e a geração de relatórios de disponibilidade dos dados (PETRY *et al.,* 2021). Em razão da escassez de estações próximas à área de estudo, foi adotado um raio de busca de 125 km a partir do centroide da bacia, permitindo a seleção de estações pluviométricas regionalmente representativas.

O fator K foi elaborado a partir do shapefile de pedologia disponibilizado no Catálogo de Metadados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Segundo os metadados, a camada de pedologia é um produto multiescalar em recorte nacional, elaborado por meio da consulta a mapeamentos do IBGE, da Embrapa, de estados e de outras fontes, resultando em uma base contínua de solos para o território brasileiro (ANA, 2017). A interpretação das classes pedológicas considerou o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018). Para a bacia do Igarapé Santos foram identificadas unidades associadas a Gleissolo Háplico, Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, às quais foram atribuídos valores de erodibilidade conforme Mannigel et al. (2002), Correa et al. (2022) e Rizzo, Silva e Tonello (2023).

O fator LS foi calculado a partir da imagem ALOS PALSAR AP_27277_FBS_F7110_RT1, disponível na plataforma ASF Data Search, da Alaska Satellite Facility. Os produtos ALOS PALSAR RTC são dados de radar corrigidos radiometricamente e geometricamente em relação ao terreno, sendo adequados para análises topográficas e ambientais (ALASKA SATELLITE FACILITY, 2015). A partir do Modelo Digital de Elevação foram derivados os rasters de declividade, direção de fluxo e acumulação de fluxo. O comprimento de rampa e a declividade foram calculados por álgebra de mapas, com base nas formulações adaptadas para SIG por Desmet e Govers (1996) e nos ajustes do fator declividade propostos por McCool et al. (1987, 1989).

O fator C foi obtido a partir dos dados de uso e cobertura da terra do Projeto TerraClass, ano-base 2022. O TerraClass, desenvolvido pelo INPE e pela Embrapa, tem como objetivo mapear a cobertura e o uso da terra nos biomas brasileiros, especialmente em áreas de supressão da vegetação nativa previamente identificadas pelo PRODES (INPE; EMBRAPA, 2024). O fator P foi atribuído de acordo com as práticas conservacionistas ou ausência delas, considerando as condições de manejo observadas na área e valores de referência utilizados em estudos de erosão hídrica. Nesta pesquisa, os fatores C e P foram integrados em um fator CP, uma vez que o uso e ocupação do solo e as condições de manejo/práticas conservacionistas foram tratados de forma conjunta.

A integração dos fatores foi realizada na Calculadora Raster do QGIS. Todos os rasters foram compatibilizados quanto ao sistema de referência, resolução espacial, extensão e limite da bacia. Após a multiplicação dos fatores R, K, LS e CP, obteve-se o raster final de perda anual de solo, denominado Fator A. O resultado foi reclassificado em oito códigos temáticos e quantificado em hectares e em percentual em relação à área total da bacia.

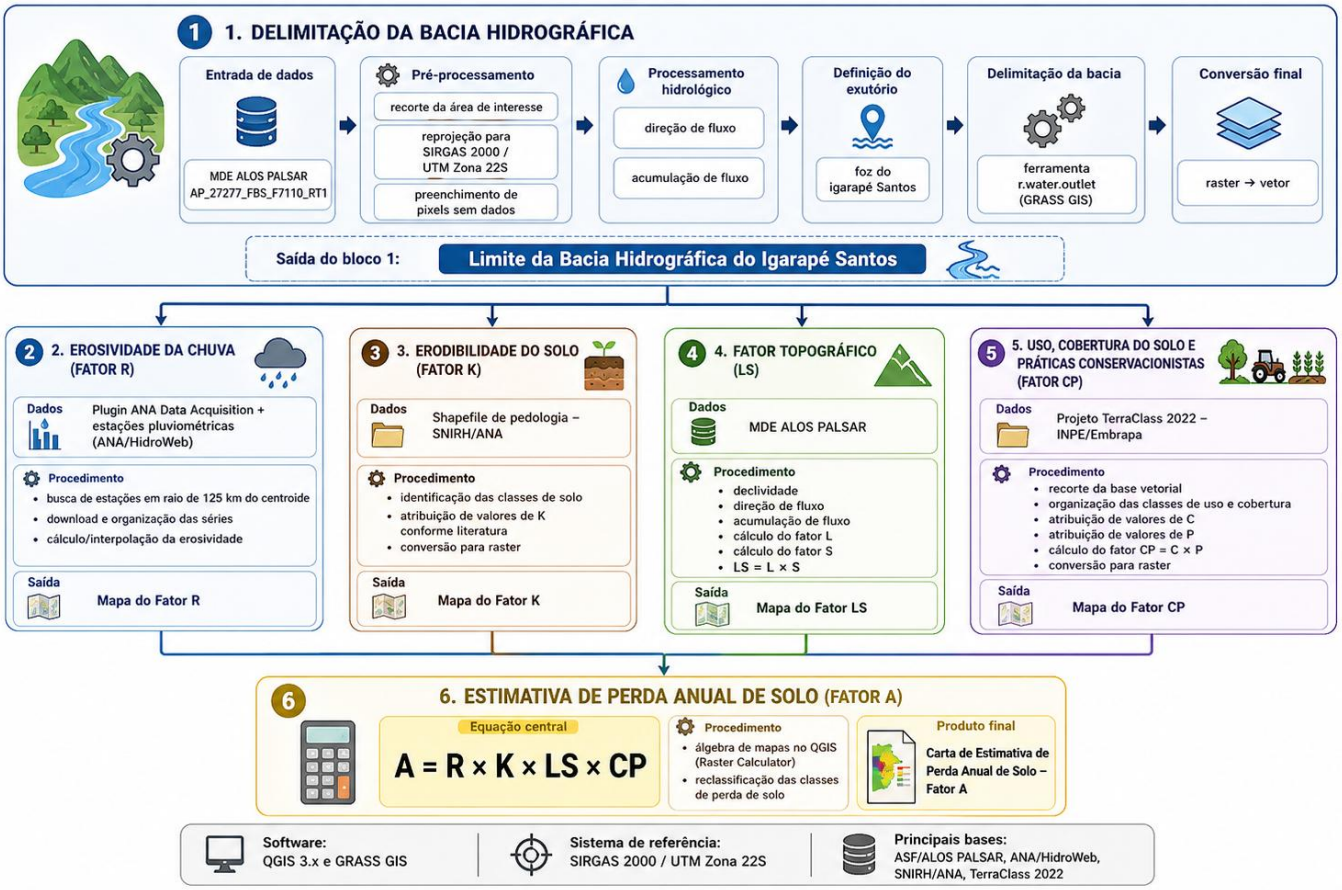


Figura 01: Fluxograma metodológico aplicado à estimativa de perda anual de solo na bacia hidrográfica do Igarapé Santos. Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Resultados e Discussão

A carta final de estimativa de perda anual de solo indicou que a bacia do Igarapé Santos possui área analisada de 5.246,15 ha. Os resultados demonstraram forte predominância das classes interpretadas como nenhuma ou ligeira perda de solo, que, somadas, representam 4.650,16 ha, equivalentes a 88,64% da área total. Essa condição indica que a maior parte da bacia apresenta baixa resposta erosiva no modelo aplicado, possivelmente em função da combinação entre relevo menos favorável à concentração de energia do escoamento, presença de cobertura vegetal ou classes de uso menos críticas e valores localizados de erodibilidade.

A distribuição espacial das classes demonstra que as áreas de maior perda potencial se concentram em porções específicas da bacia, principalmente em setores onde se combinam maior energia topográfica, ocupação antrópica e menor proteção superficial do solo. A espacialização do Fator A é relevante porque permite observar não apenas a proporção das classes, mas também sua posição na paisagem e sua relação com a rede de drenagem, margens de igarapés, áreas urbanizadas e zonas de transição entre coberturas do solo.

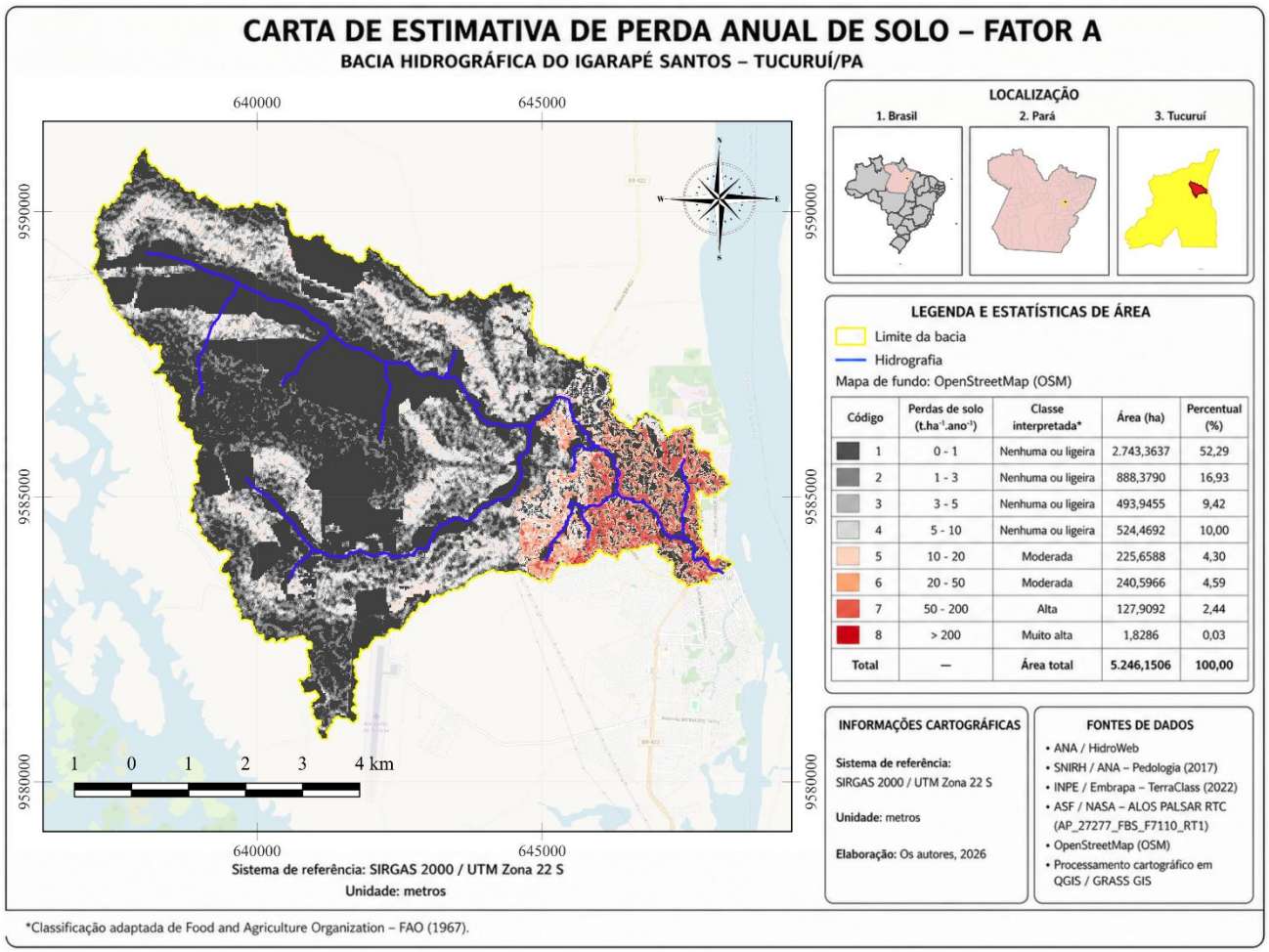


Figura 02: Carta de estimativa de perda anual de solo - Fator A na Bacia Hidrográfica do Igarapé Santos, Tucuruí/PA. Fonte: elaborado pelos autores (2026), com base em ANA/HidroWeb, SNIRH/ANA, INPE/Embrapa, ASF/NASA e OpenStreetMap.

As classes moderadas representaram 466,26 ha, ou 8,89% da bacia. Essas áreas exigem atenção intermediária, pois podem se tornar mais suscetíveis à erosão caso ocorram mudanças de uso da terra, retirada de vegetação, abertura de estradas vicinais, loteamentos ou intensificação de atividades agropecuárias. Em bacias de pequeno porte, áreas moderadas também podem atuar como zonas de transição entre setores estáveis e áreas de maior instabilidade, principalmente quando localizadas próximas a drenagens, cabeceiras ou encostas com aumento de declividade.

As classes alta e muito alta somaram 129,74 ha, correspondendo a 2,47% da área analisada. Embora representem percentual reduzido da bacia, esses setores devem ser considerados prioritários para ações de manejo e controle ambiental. Áreas com alta perda potencial de solo tendem a concentrar a atuação combinada de fatores críticos, como maior declividade, comprimento de vertente, solo mais suscetível, cobertura insuficiente e concentração do escoamento superficial. Em termos de planejamento, esses locais são os mais importantes para ações preventivas, pois pequenas áreas críticas podem contribuir de forma significativa para o aporte de sedimentos aos canais de drenagem.

Tabela 01: Distribuição das classes da Carta de Estimativa de Perda Anual de Solo na bacia do Igarapé Santos.

Código	Perdas de solo (t.ha⁻¹.ano⁻¹)	Classe interpretada*	Área (ha)	Percentual (%)
1	0 - 1	Nenhuma ou ligeira	2.743,3637	52,29
2	1 - 3	Nenhuma ou ligeira	888,3790	16,93
3	3 - 5	Nenhuma ou ligeira	493,9455	9,42
4	5 - 10	Nenhuma ou ligeira	524,4692	10,00
5	10 - 20	Moderada	225,6588	4,30
6	20 - 50	Moderada	240,5966	4,59
7	50 - 200	Alta	127,9092	2,44
8	> 200	Muito alta	1,8286	0,03
Total			**5.246,1506**	**100,00**

Fonte: elaborado pelos autores (2026).
**Classificação segundo Food and Agriculture Organization - FAO (1967).*

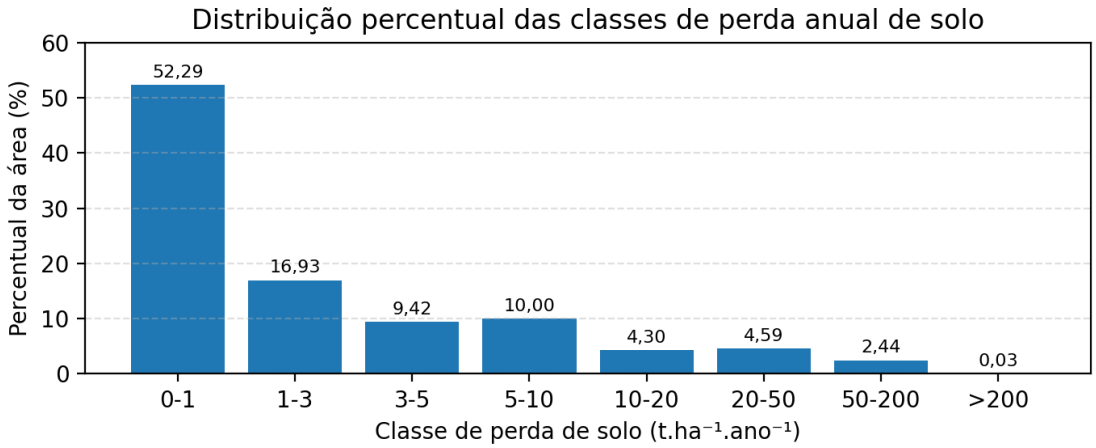


Figura 03: Distribuição percentual das classes de perda anual de solo na bacia do Igarapé Santos. Fonte: elaborado pelos autores (2026).

A predominância das classes nenhuma ou ligeira não elimina a necessidade de gestão ambiental da bacia. O resultado indica uma condição geral favorável, porém a espacialização das classes evidencia a existência de manchas com maior potencial erosivo, especialmente nos setores classificados como alta e muito alta. Essas áreas devem ser confrontadas com o uso atual do solo, a presença de estradas, taludes, margens de igarapés e áreas de solo exposto, uma vez que a erosão hídrica é fortemente influenciada por intervenções locais. A interpretação espacial é, portanto, tão importante quanto os percentuais gerais obtidos.

Os resultados são coerentes com a lógica da EUPS/USLE, na qual a perda anual de solo aumenta quando se combinam chuvas erosivas, solos mais erodíveis, maior energia topográfica e baixa proteção da superfície. Conforme Wischmeier e Smith (1978), o modelo foi desenvolvido para estimar perdas médias anuais de solo e deve ser interpretado como uma ferramenta de apoio ao planejamento, e não como medição direta de campo. Nesse sentido, a carta produzida permite hierarquizar áreas de atenção e orientar estudos posteriores com maior detalhamento, incluindo validação de campo, identificação de feições erosivas e monitoramento de sedimentos.

A utilização de bases oficiais e produtos abertos fortalece a reprodutibilidade do trabalho. O uso do TerraClass 2022 permitiu incorporar uma base padronizada de uso e cobertura da terra; o shapefile de pedologia do SNIRH forneceu uma base contínua de solos; o plugin ANA Data Acquisition facilitou a obtenção e seleção de dados pluviométricos; e a imagem ALOS PALSAR forneceu a base topográfica necessária ao cálculo do fator LS. Por outro lado, a principal limitação metodológica está relacionada à escala e à qualidade das bases secundárias, especialmente quanto à resolução espacial da pedologia e à disponibilidade de estações pluviométricas próximas à área de estudo. A adoção do raio de 125 km para seleção de estações foi uma solução metodológica necessária diante da escassez regional de dados, mas pode introduzir generalizações na estimativa do fator R.

A carta de perda anual de solo deve ser utilizada como instrumento de planejamento ambiental da bacia do Igarapé Santos. As áreas classificadas como moderada, alta e muito alta devem receber prioridade em ações como recomposição da cobertura vegetal, proteção de margens de cursos d'água, controle de drenagem superficial, adequação de estradas e restrição à exposição prolongada do solo. Para o Município de Tucuruí, esse tipo de mapeamento pode contribuir para a gestão de microbacias, o planejamento urbano e rural e a redução de impactos sobre os sistemas de drenagem local.

Em síntese, a bacia do Igarapé Santos apresenta predominância de baixa perda anual estimada, mas contém setores específicos com potencial erosivo elevado. A principal contribuição da carta produzida é permitir que esses setores sejam visualizados e priorizados. Para a gestão municipal, o produto pode auxiliar ações de fiscalização, licenciamento, recuperação ambiental, planejamento de drenagem urbana e proteção das margens dos cursos d'água, especialmente nos trechos em que a expansão urbana e a fragilidade ambiental se sobrepõem.

A integração dos fatores em ambiente SIG também favorece a atualização futura do estudo. Caso novas bases de uso e cobertura do solo, séries pluviométricas mais completas ou modelos digitais de elevação de maior resolução estejam disponíveis, a metodologia pode ser reaplicada com maior detalhamento. Isso torna o procedimento útil para o acompanhamento temporal da bacia, permitindo comparar cenários, avaliar o avanço da ocupação e verificar se as áreas críticas se expandem, reduzem ou se deslocam no espaço.

Outro aspecto importante refere-se à escala dos dados de entrada. A base pedológica do SNIRH possui caráter multiescalar, o TerraClass apresenta classificação padronizada em escala regional e os dados pluviométricos dependem da disponibilidade de estações. Dessa forma, a carta final deve ser compreendida como uma estimativa espacial da perda potencial de solo, adequada ao planejamento e à identificação de prioridades, mas não substitui medições diretas de erosão ou levantamentos detalhados de campo. A interpretação dos resultados deve considerar essa natureza estimativa do modelo.

A relação entre o fator CP e o resultado final merece destaque, pois o uso e cobertura da terra, associado às práticas conservacionistas, influencia diretamente a proteção da superfície contra o impacto das gotas de chuva e contra o escoamento superficial. A adoção do fator CP permitiu considerar, em uma única camada, a condição de cobertura e o efeito do manejo da área. Essa opção metodológica é adequada para estudos com dados secundários, mas deve ser refinada em estudos futuros com

levantamento de campo sobre práticas de plantio, presença de terraços, cobertura morta, pastagens degradadas e áreas urbanizadas com drenagem deficiente.

Do ponto de vista do planejamento ambiental, os resultados sugerem que a gestão da bacia deve combinar estratégias preventivas e corretivas. Nas áreas de baixa perda estimada, a prioridade deve ser a manutenção da cobertura atual e a prevenção de novas exposições do solo. Nas áreas moderadas, recomenda-se atenção ao uso do solo e ao controle do escoamento. Nas áreas alta e muito alta, as ações devem ser mais direcionadas, incluindo diagnóstico de campo, identificação de feições erosivas, recomposição de vegetação ciliar e controle de drenagens concentradas.

A classe alta, entre 50 e 200 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$, ocupou 127,91 ha, enquanto a classe muito alta, acima de 200 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$, apresentou 1,83 ha. Mesmo com pequena representatividade percentual, essas áreas indicam focos de maior criticidade ambiental e podem exercer influência significativa na produção de sedimentos da bacia. A concentração de sedimentos oriundos de pequenas áreas instáveis pode afetar canais de drenagem, reduzir a qualidade da água, favorecer assoreamento e aumentar custos de manutenção de infraestruturas próximas a cursos d'água.

A classe de 10 a 20 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$ correspondeu a 225,66 ha, enquanto a classe de 20 a 50 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$ alcançou 240,60 ha. Essas duas faixas, classificadas como moderadas, representam ambientes de transição e devem ser monitoradas principalmente quando associadas a solos mais erodíveis, encostas com maior comprimento de rampa ou áreas de ocupação recente. Em termos de manejo, esses setores podem responder positivamente a medidas simples de conservação, como manutenção da cobertura vegetal, controle de enxurradas, revegetação de taludes e redução da exposição direta do solo.

As demais classes enquadradas como nenhuma ou ligeira, entre 1 e 10 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$, somam 1.906,79 ha, equivalentes a 36,35% da bacia. Esse conjunto indica que grande parte da área apresenta perda estimada relativamente controlada, mas ainda sujeita a variações locais relacionadas ao escoamento superficial. A presença de manchas espacialmente descontínuas mostra que a bacia não responde de forma homogênea, o que justifica o uso de abordagem espacial em ambiente SIG em vez de uma estimativa única para toda a unidade hidrográfica.

A análise por faixas de perda anual reforça que a classe 0 a 1 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$ é a mais representativa, abrangendo 2.743,36 ha, ou 52,29% da bacia. Essa classe indica setores de baixa suscetibilidade no resultado final do modelo, mas deve ser interpretada em conjunto com a cobertura da terra e com a dinâmica de ocupação local. Em áreas tropicais, alterações rápidas no uso do solo podem modificar a proteção superficial e deslocar setores atualmente estáveis para classes mais críticas, sobretudo quando ocorre abertura de vias, terraplenagem ou remoção de vegetação em margens de drenagem.

Por fim, recomenda-se que a carta produzida seja utilizada como diagnóstico inicial e como referência para estudos posteriores. A validação em campo, a atualização do uso e cobertura do solo e a inclusão de informações sobre drenagem urbana, estradas e pontos de erosão observados podem melhorar a precisão da análise. Ainda assim, o resultado obtido já oferece uma leitura consistente da distribuição espacial da suscetibilidade à perda de solo na Bacia Hidrográfica do Igarapé Santos e contribui para decisões ambientais mais direcionadas.

A espacialização da perda anual de solo também permite apoiar a comunicação dos resultados para gestores públicos e comunidades locais. Mapas temáticos facilitam a compreensão da relação entre cobertura da terra, relevo, solo e chuva, tornando mais evidente que a erosão não depende de um único fator isolado. Esse aspecto é relevante para o planejamento territorial, pois mostra que medidas de conservação devem ser integradas, combinando manejo do uso do solo, proteção da drenagem, manutenção de vegetação e obras simples de controle de escoamento superficial.

A classe moderada também possui importância estratégica, pois pode funcionar como área de alerta. Embora seus valores não representem a condição mais crítica do modelo, a permanência de solo exposto, o aumento da compactação, o pisoteio, a abertura de vias e a impermeabilização parcial podem elevar a resposta erosiva ao longo do tempo. Portanto, essas áreas devem ser consideradas em ações preventivas, sobretudo quando localizadas em cabeceiras de drenagem, próximas à zona urbana ou em áreas com expansão de uso agropecuário.

Considerando a finalidade aplicada do estudo, a carta de perda anual de solo pode ser utilizada como base para a seleção de áreas prioritárias para intervenções. Os trechos classificados como alta e muito alta perda devem ser vistoriados de forma preferencial, pois representam pontos onde a combinação dos fatores naturais e antrópicos indicou maior possibilidade de remoção de material superficial. Nessas áreas, a avaliação de campo pode confirmar a presença de sulcos, ravinas iniciais, taludes expostos, estradas sem dispositivos de drenagem ou margens de igarapés com vegetação insuficiente.

Tabela 02: Síntese dos fatores, bases de dados e produtos gerados para a estimativa da perda anual de solo.

Fator	Base utilizada	Processamento	Produto gerado
R	Estações pluviométricas ANA/HidroWeb	Aquisição pelo ANA Data Acquisition, seleção em raio de 125 km, cálculo e interpolação	Mapa de erosividade da chuva
K	Pedologia SNIRH/ANA	Recorte da base, interpretação das classes e atribuição dos valores de K conforme literatura	Mapa de erodibilidade do solo
LS	MDE ALOS PALSAR	Declividade, direção de fluxo, acumulação de fluxo e cálculo dos fatores L e S	Mapa do fator topográfico
CP	TerraClass 2022 e práticas de manejo	Reclassificação do uso e cobertura e associação às práticas conservacionistas	Mapa do fator CP
A	R, K, LS e CP	Álgebra de mapas pela EUPS/USLE e reclassificação dos resultados	Carta de estimativa de perda anual de solo

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

A Tabela 02 resume a integração metodológica dos fatores utilizados no modelo. A organização desses dados contribui para a reprodutibilidade do trabalho, pois permite identificar a origem de cada camada, o tratamento espacial realizado e o produto final incorporado à álgebra de mapas. Essa sistematização é importante em estudos ambientais aplicados, nos quais diferentes bases cartográficas, sensores remotos e informações secundárias precisam ser compatibilizados em um mesmo sistema de referência e em uma mesma unidade espacial de análise.

Considerações Finais

A aplicação da EUPS/USLE em ambiente SIG permitiu elaborar a Carta de Estimativa de Perda Anual de Solo da bacia do Igarapé Santos, integrando fatores climáticos, pedológicos, topográficos e de uso da terra. A área analisada apresentou predomínio de classes de perda nenhuma ou ligeira, correspondendo a 88,64% da bacia. As classes moderadas representaram 8,89%, enquanto as classes alta e muito alta corresponderam a 2,47%.

Apesar do predomínio de baixa perda potencial, os setores classificados como alta e muito alta devem ser considerados áreas prioritárias para controle ambiental, pois tendem a concentrar maior contribuição relativa para a produção de sedimentos. Recomenda-se a realização de verificações de campo, atualização periódica do uso e cobertura do solo, avaliação das margens dos cursos d'água e adoção de práticas conservacionistas nas áreas mais suscetíveis. A metodologia aplicada mostrou-se adequada para subsidiar o planejamento ambiental da bacia e pode ser replicada em outras microbacias do Município de Tucuruí.

Agradecimentos

Os autores agradecem às instituições responsáveis pela disponibilização das bases utilizadas neste estudo, especialmente ANA/SNIRH, INPE, Embrapa, Alaska Satellite Facility, OpenStreetMap e Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por meio do plugin ANA Data Acquisition.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). Pedologia. Catálogo de Metadados da ANA/SNIRH. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/ffeb6007-b741-4099-9889-5d50b3cd4168. Acesso em: 30 abr. 2026.

ALASKA SATELLITE FACILITY. Radiometrically Terrain Corrected ALOS PALSAR products: product guide. Fairbanks: ASF, 2015. Disponível em: https://asf.alaska.edu. Acesso em: 30 abr. 2026.

CARVALHO, Newton de Oliveira. Hidrossedimentologia prática. 2. ed. rev., atual. e ampl. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CORREA, N. F. et al. Álgebra de mapas na estimativa qualitativa de perda de solo anual por erosão hídrica laminar na Bacia do Rio Dourados. Terr@Plural, Ponta Grossa, v. 16, p. 1-24, 2022.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. Journal of Soil and Water Conservation, Ankeny, v. 51, n. 5, p. 427-433, 1996.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. La erosión del suelo por el agua: algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. Roma: FAO, 1967. 207 p. (Cuadernos de Fomento Agropecuario, n. 81).

GRASS DEVELOPMENT TEAM. r.water.outlet: creates watershed basins from a drainage direction map. GRASS GIS 8.4.3dev Reference Manual, 2025. Disponível em: https://grass.osgeo.org/grass-stable/manuals/r.water.outlet.html. Acesso em: 2 maio 2026.

IBGE. Tucuruí: cidades e estados. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2025. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/tucurui.html. Acesso em: 30 abr. 2026.

INPE; EMBRAPA. TerraClass: cobertura e uso da terra nos biomas brasileiros. Brasília: INPE; Embrapa, 2024. Disponível em: https://www.terraclass.gov.br/. Acesso em: 30 abr. 2026.

MANNIGEL, A. R.; CARVALHO, M. P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. Acta Scientiarum Agronomy, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002.

McCOOL, D. K.; BROWN, L. C.; FOSTER, G. R.; MUTCHLER, C. K.; MEYER, L. D. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v. 30, n. 5, p. 1387-1396, 1987.

McCOOL, D. K.; FOSTER, G. R.; MUTCHLER, C. K.; MEYER, L. D. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v. 32, n. 5, p. 1571-1576, 1989.

OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS. OpenStreetMap. 2026. Disponível em: https://www.openstreetmap.org/copyright. Acesso em: 2 maio 2026.

PETRY, Ingrid et al. Manual de aplicação plugin ANA Data Acquisition V 1.0. Manual Técnico. Porto Alegre: HGE/IPH/UFRGS, 2021.

RIZZO, Felipe Alexandre; SILVA, Débora Cristina da Cunha e; TONELLO, Paulo Sérgio. Análise da vulnerabilidade dos solos quanto à erosão hídrica na bacia do Córrego Pequiá, Açailândia, Maranhão. Revista do Departamento de Geografia, São Paulo, v. 43, e192740, 2023.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

WISCHMEIER, Walter H.; SMITH, Dwight D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1978. 58 p. (Agriculture Handbook, n. 537).

CARACTERIZAÇÃO DA POLUIÇÃO LUMINOSA NO PARQUE ESTADUAL DA SERRA DO BRIGADEIRO - MG POR SENSORIAMENTO REMOTO

1 Gustavo Pinheiro, 2 Fernanda dos Santos Caciquinho e Sousa, 3 Anita Góes Nobre de Azevedo, 4 Daniel Rodrigues Costa Mello

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro (IFRJ), e-mail: gustavo.pinheiro@ifrj.edu.br;
2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro (IFRJ), e-mail: fercaciquinho.sousa@gmail.com;
3 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro (IFRJ), e-mail:anitagnobre@gmail.com;
4Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Instituto Astroparques, e-mail:mello@ov.ufrj.br

Palavras-chave:poluição luminosa; meio ambiente; sensoriamento remoto.

Resumo

Responsável por diversos danos à saúde, aos ecossistemas e por limitar a contemplação do céu estrelado, a crescente poluição luminosa em todo o planeta se estabelece como um sério desafio. Resguardar áreas ambientalmente sensíveis, como as unidades de conservação, se torna indispensável. Para tal, compreender o problema enfrentado é o primeiro passo. A presente pesquisa buscou, por uso do sensoriamento remoto, caracterizar a poluição luminosa no Parque Estadual da Serra do Brigadeiro - MG, apontando regiões ameaçadas e principais fontes. Os resultados revelam o crescimento da radiância desde o ano de 2012 em todos os setores do parque. Revelam, sobretudo, o maior impacto para regiões mais ao sul e oeste, na proximidade de pequenos municípios, distritos e comunidades, demonstrando o potencial poluidor de pequenos povoados urbanos e associações rurais.

Introdução

A alteração dos padrões naturais da luminosidade noturna provocada pela iluminação artificial crescente se estabelece como uma preocupante intervenção humana no planeta. Avanços tecnológicos na produção de lâmpadas, painéis e demais dispositivos os tornam mais econômicos e acessíveis, estimulando seu uso excessivo, mal planejado e inadequado, intensificando o que se designa por poluição luminosa.

A escassez de debates sobre o tema menospreza os diversos danos causados ao meio ambiente e à saúde humana, sobretudo na desregulação do ciclo circadiano, do sono e consequências destes (Nicholls, 2019). Soma-se a isso a privação imposta sobre a maior parte da população mundial de contemplação do céu estrelado (Falchi et al., 2016), impactando na educação, cultura, reduzindo a percepção de pertencimento e bem estar.

Dentre os incontáveis prejuízos aos ecossistemas pode-se destacar a diminuição dos ciclos de polinização noturna realizados por insetos, a morte precoce de tartarugas marinhas após eclosão, interferência na comunicação e reprodução dos vaga-lumes, desorientação na trajetória das aves migratórias, influência sobre a predação, alteração nos ciclos vegetativos de variadas espécies de plantas, etc. Para detalhes sobre os efeitos mencionados, recomenda-se a consulta ao relatório Artificial Light at Night: State of the Science 2025 (Darksky International, 2025) e referências ali contidas.

Nesse contexto, o Instituto Astroparques têm se dedicado na promoção de educação ambiental para a mitigação da poluição luminosa, incentivo à prática do astroturismo, divulgação da ciência e na pesquisa científica, com destaque para o controle e monitoramento da poluição luminosa em áreas ambientalmente sensíveis.

Desde 2024, a equipe realiza ações no Parque Estadual da Serra do Brigadeiro (PESB), que corresponde a um dos últimos redutos de Mata Atlântica preservada na região sudeste do estado de Minas Gerais. Cercado por oito pequenas cidades, essa reserva ambiental é refúgio de importantes espécies de flora e fauna, abarca importantes pesquisas científicas, especialmente sobre biodiversidade, além de ser um território cada vez mais buscado para o turismo rural e de natureza.

Nesse ambiente, o astroturismo têm figurado como atividade de interesse da região (g1, 2025). Essa modalidade de turismo une educação ambiental, preservação e desenvolvimento sustentável, promovendo uma reconexão das pessoas com o céu estrelado. Trata-se de uma prática de contemplação do céu, debates sobre temas da astronomia, preservação, cultura e história, usualmente realizada em locais distantes de grandes centros urbanos, onde a intensa poluição luminosa prejudica a visualização dos astros.

O alto potencial do PESB para o astroturismo tem alcançado reconhecimento a partir de um empreendimento importante, sua categorização como Parque de Céu Escuro (Dark Sky Park). Trata-se de um certificado internacional concedido pela DarkSky International, principal autoridade global no combate à poluição luminosa e preservação do céu noturno. Certamente, o êxito desta proposição depende especialmente do conhecimento acerca da iluminação artificial emitida no interior e entorno da região que se pretende resguardar, além do monitoramento da qualidade do céu em termos de poluição luminosa.

Buscando a preservação dos ecossistemas na região da Serra do Brigadeiro e o estabelecimento do astroturismo como atividade econômica sustentável, a presente pesquisa buscou avaliar, a partir do sensoriamento remoto, a evolução temporal da radiância emitida pelas comunidades e cidades limítrofes seus impatcos sobre o parque, além de identificar potenciais ameaças.

É desejado que as conclusões desta pesquisa possam subsidiar possíveis intervenções necessárias para preservação ambiental dessa e outras reservas, ao mesmo tempo em que possibilitem resguardo do céu estrelado como patrimônio natural, servindo para atividades de lazer, saúde, educação, cultura e bem-estar.

Material e Métodos

Dentre as diversas ferramentas para estudo da poluição luminosa, o uso do sensoriamento remoto se destaca por seu fácil acesso. Dados atualizados de radiância (potência luminosa por unidade de área e ângulo sólido), emitida pelas cidades, vilas, comunidades, etc. são obtidos diariamente por satélites e podem ser acessados gratuitamente em sítios da internet ou plataformas.

Com este fim, é apropriado o emprego dos dados tomados do Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS), um sensor projetado e fabricado pela Raytheon Company, localizado a bordo do satélite meteorológico de órbita polar Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP). Lançado em 2011, com início de coleta de dados de radiância em abril de 2012, o equipamento têm sido amplamente utilizado para análise de poluição luminosa, com resolução de 750 m por pixel, o dispositivo opera na faixa espectral de 500 nm a 900 nm.

As informações de radiância capturadas pelo sensor VIIRS podem ser obtidas de diferentes formas, como a plataforma Google Earth Engine, do sítio do Earth Observational Group (Payne Institute for Public Policy, 2026) e, de maneira mais simples, a partir da plataforma **Radiance Light Trends** (Kyba, [s.d.]). A vantagem da última opção reside na facilidade de obtenção de dados de radiância mensais e anuais, seleção dos mesmos, recursos gráficos e mapas, facilidade na seleção de limites da área analisada, filtragem prévia de noites sem nuvens e incêndios, correção de ruído de fundo, luz da lua, entre outros; razões pelos quais foi selecionada para o presente trabalho.

A primeira aplicação da plataforma consistiu de uma análise preliminar do grau de impacto das luzes artificiais em determinada região a cada ano a partir de um recurso gráfico simples, a exposição da radiância média anual em escala de cores sobreposta ao mapa do Open Street Map (OpenStreetMap contributors, 2026). A Figura 1 mostra essa execução para a região de interesse, o Parque Estadual da Serra do Brigadeiro em anos distintos.

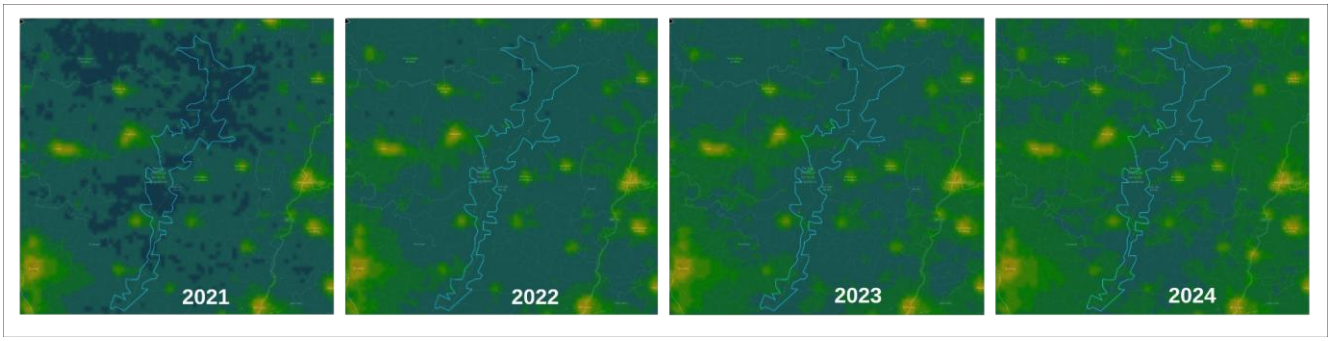


Figura 1 – Mapa de radiância: Mapa de cores de radiância no PESB e vizinhanças entre os anos 2021 e 2024. As cores mais escuras indicam regiões menos afetadas, enquanto as regiões mais claras indicam mais alta radiância.
Fonte: Recorte de Radiance Light Trends com imagem e processamento de NOAA's National Geophysical Data Center.

O aumento da radiância notado no entorno e interior do Parque é evidenciado pelo avanço dos tons mais claros com o passar dos anos. Esse é o primeiro indicativo dos pontos críticos avaliados. Os locais que apresentam maior avanço da radiância percebido visualmente nos mapas de cor são pré-selecionados para coleta de dados e posterior análise.

Para obter o quadro geral da evolução da poluição luminosa no parque, é traçado com uso da ferramenta de criação de polígono, um contorno dos limites do parque. Deste, são extraídos dados mensais de radiância (veja a figura 2a) dos pixels interiores. Dessa maneira, a evolução temporal é verificada por ajuste da curva de radiância x ano (Figura 5). O panorama geral obtido do Parque serve como referência para comparações que serão feitas entre este e os setores críticos.

É importante ressaltar que um tratamento prévio dos valores de radiância adquiridos é indispensável em todas as etapas, uma vez que os dados brutos contém valores atípicos (*outliers*). Pode, ainda, incluir valores negativos irreais, decorrente do processamento e correções aplicadas aos dados do satélite, sendo comum em localidades muito escuras em virtude da baixa intensidade do sinal. Esses valores negativos são removidos da amostra, enquanto os *outliers* são identificados e descartados pelo método do desvio absoluto mediano (MAD). A representação dos dados anuais, por sua vez, é feita por cálculo da mediana dos meses.

Assim, as áreas sensíveis já identificadas pelo método visual, como mencionadas anteriormente, são examinadas de maneira similar ao cenário geral do Parque, com a diferença de termos o polígono traçado apenas na região de interesse, que denominamos setores, os quais são indicados na figura 2b. A extensão do perfil traçado é definida de forma a incluir os pixels visualmente mais claros do mapa do ano de 2024, onde o mesmo tratamento de dados citado no parágrafo anterior é aplicado.

Após os desenvolvimentos descritos acima, é possível comparar a evolução da radiância em regiões sensíveis com aquela do Parque em sua totalidade, evidenciando os possíveis comportamentos atípicos provocados pelo aumento de fontes luminosas no entorno.

A etapa final da investigação consiste em inferir os principais causadores do aumento da poluição luminosa no interior do Parque, uma vez que as diversas localidades desse são afetadas por fontes de luz exteriores a ele, em geral cidades, distritos e comunidades. Uma perspectiva visual da influência das fontes pode ser obtida dos mapas de cor, indicando localidades suspeitas, mas que devem estar sujeitas a um tratamento matemático mais fiel. Isso é feito com base em modelos atmosféricos para o decaimento da luz com a distância.

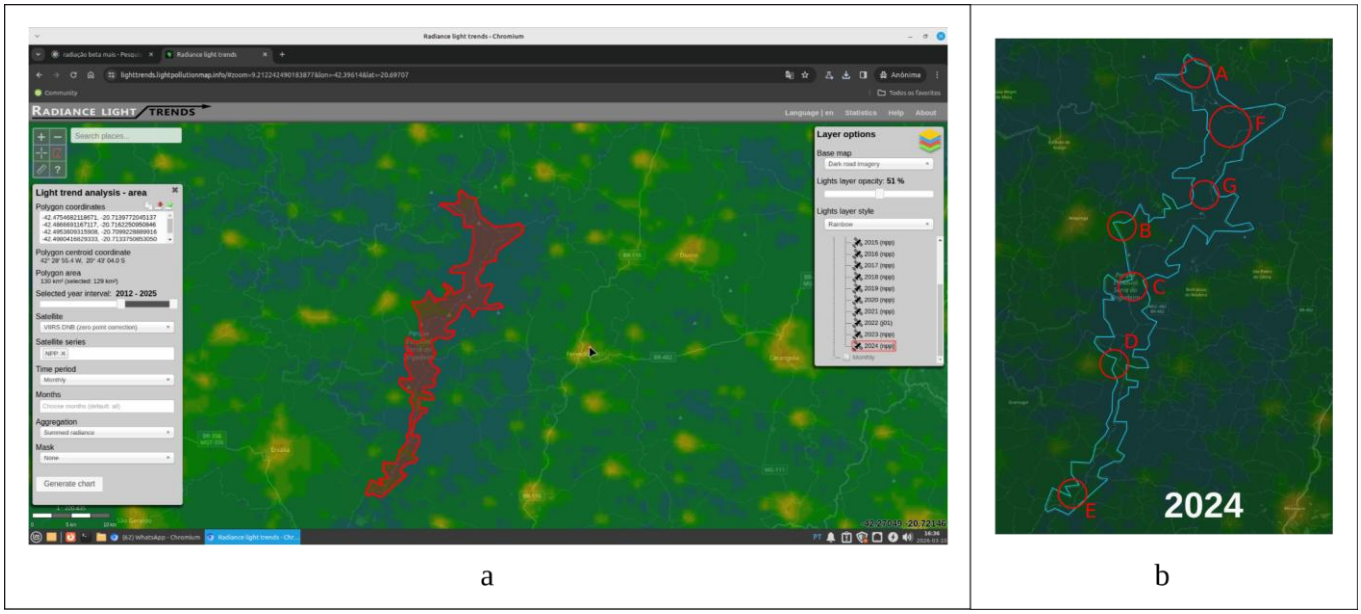


Figura 2a: Polígono de análise da totalidade do parque. Dados de radiância são extraídos de pixels internos ao limite.
Figura 2b: Setores localizados. Obtenção da radiância em pixels internos a contornos traçados para cada setor.
Fonte: Radiance Light Trends com imagem e processamento de NOAA's National Geophysical Data Center.

É compreendido da literatura científica (Walker, 1971), (Garstang, 1986) que a influência da luz de determinada cidade, comunidade ou localidade é proporcional ao fluxo luminoso emitido pela mesma e inversamente proporcional à distância *d* para o ponto em análise elevada a um expoente α, que pode variar para curtas ou grandes distâncias. Tipicamente esse expoente assume valores entre 1,9 e 4,5, porém, para as distâncias em jogo, pode-se inferir valores entre 1,9 e 3,3.

Influência ∝ (Fluxo luminoso da cidade) / (d^{α}) (1)

Para o presente trabalho, o fluxo luminoso corresponde à radiância média do ano de 2025, em um quadrado de 4,0 km² de área, traçado na plataforma, cobrindo a região central da cidade investigada. Uma régua virtual permite fazer a medição da distância entre dada cidade e o ponto de interesse. Pode-se então aplicar a relação acima e averiguar as influências relativas sobre localidades do PESB.

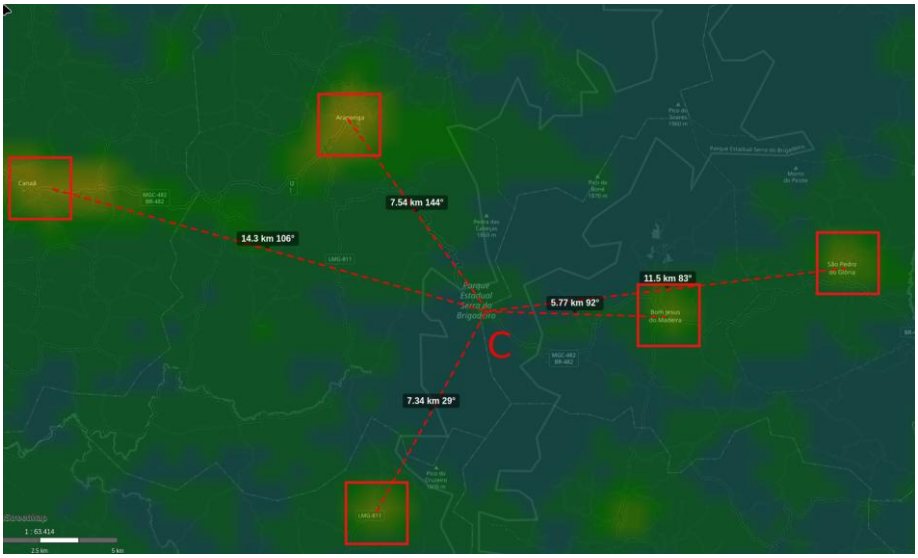


Figura 3: Contribuições relativas das cidades. Dados de radiância média são extraídos de pixels internos a um quadrado de 4,0 km² traçado região central de cidades que distam de até 50 km do ponto de interesse.
Fonte: Recorte do Radiance Light Trends com imagem e processamento de NOAA's National Geophysical Data Center.

A metodologia de trabalho consta de diferentes ações, que podem ser aplicadas de forma independente. O quadro da figura 4 exibe estas ações como segmentos. Ao fim são interpretados os resultados.

	Qual a razão?	Como é feito?
Segmento I – Verificação visual e definição dos setores de análise	Identificar previamente os setores do Parque mais afetados pela poluição luminosa.	Através de análise visual dos tons no mapa de cores do ano de 2024 da plataforma.
Segmento II – Análise quantitativa da radiância nos Setores identificados	Quantificar a radiância atual em cada setor (ano 2025) e a evolução temporal da mesma (anos de 2012 a 2025).	Através da construção de polígono de análise localizado em cada setor estudado contendo pixels visualmente mais claros percebidos no mapa de cores para obtenção de dados. Após é feito tratamento estatístico e ajuste linear da radiância (mediana dos anos) no gráfico Radiância x Ano.
Segmento III – Analise quantitativa da radiância do parque em sua totalidade	Quantificar a radiância atual no interior do parque como um todo (ano 2025) , a evolução temporal da mesma (anos de 2012 a 2025) e servir de *background* para a análise dos setores.	Através da construção de polígono de análise contornando todo o parque para obtenção de dados. Após é feito tratamento estatístico e ajuste linear da radiância (mediana dos anos) no gráfico Radiância x Ano.
Segmento IV – Identificação das fontes poluidoras	Conhecer as fontes causadoras do problema e grau de impacto.	Através da construção de polígonos de análise quadradados de 2,0 km de lado na região central de cada cidade para obtenção da radiância emitida por estas. Para a medição da distância entre a cidade poluidora e o setor afetado é feito uso de régua virtual. Ao fim se aplica a equação (1) para cada cidade.

Figura 4: Síntese da metodologia. Quadro geral dos segmentos que compõem a metodologia.
Fonte: Autores

Resultados e Discussão

Os dados mensais da radiância no contorno total do Parque revelam uma tendência de aumento para a evolução (ver Figura 5). De fato, o ajuste de curva das medianas anuais por uma função do primeiro grau indica um crescimento absoluto na radiância de $2{,}80.10^{-2}$ nW/(cm².sr) por ano, com coeficiente de determinação $R^2 = 0{,}90$. Tem-se, ainda, que a mediana das radiâncias obtidas no ano de 2025 foi de 0,41 nW/(cm².sr). Estes são os valores referência para as comparações que se seguem.

Paralelamente, a observação do mapa de cores de radiância do ano de 2024 leva à indicação de cinco setores críticos (Figura 2b), designados por A, B, C, D e E, nas imediações dos quais são traçados polígonos de análise englobando os pixels mais claros. Para comparação, foram também investigados dois setores mais escuros, designados por F e G, totalizando sete setores.

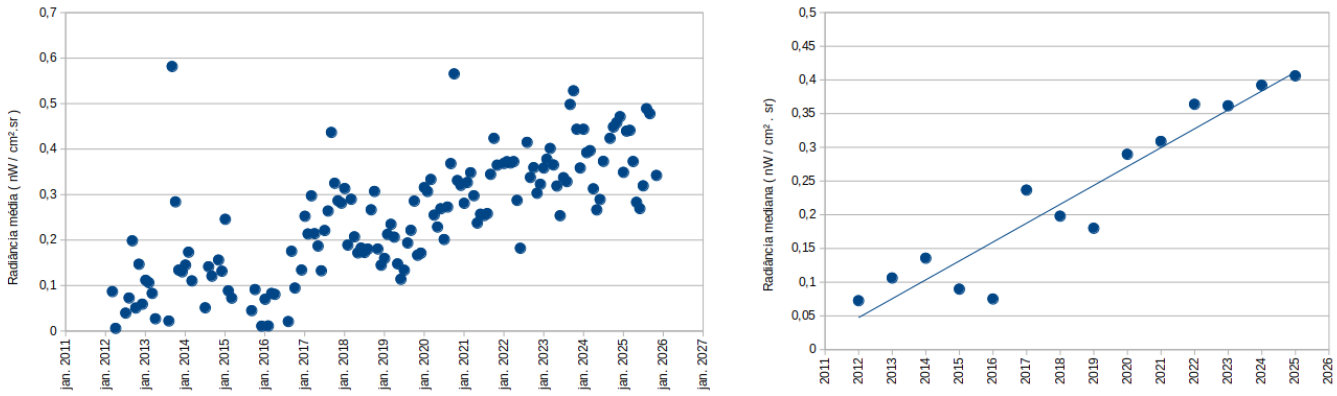


Figura 5: Evolução da radiância no Parque Estadual da Serra do Brigadeiro. O painel da esquerda mostra os dados médios mensais. O painel da direita expõe a mediana calculada para cada ano.
Fonte: Autores

O mesmo comportamento de crescimento da radiância notado no parque como um todo é observado nos sete setores descritos, para os quais os ajustes de curva lineares levam a coeficientes de determinação próximos ou superiores a 0,85. Um

panorama comparativo entre os diferentes setores e a tendência global do parque pode ser visto na Tabela 1. A primeira coluna identifica o setor investigado. A segunda, o valor da radiância para o ano de 2025 em cada setor, e para o Parque como um todo na última linha, sendo este último um valor de referência para as comparações. A terceira coluna, mostra o desvio percentual da radiância do ano de 2025 em relação ao Parque. Na quarta coluna, consta a taxa de crescimento da radiância em uma análise temporal entre os anos de 2012 e 2025 para os setores. Na última coluna, se exibe o desvio percentual da taxa de crescimento em cada setor com relação ao Parque.

Setor	Radiância mediana do ano de 2025 (nW/cm².sr)	Desvio percentual da radiância (2025) do setor em relação à radiância do Parque	Taxa de variação média anual da radiância (x 10^{-2} nW/cm².sr)	Desvio percentual da taxa anual de variação da radiância do setor em relação à do Parque
A	0,33	-19,5 %	2,50	-10,7 %
B	0,48	17,07 %	3,53	26,1 %
C	0,40	- 2,4 %	2,63	-6,1 %
D	0,49	19,5 %	3,49	24,6 %
E	0,46	12,2 %	3,03	6,1 %
F	0,39	-4,9 %	2,67	-4,6 %
G	0,38	-7,3 %	2,51	-10,4 %
PESB	**0,41**	----------	**2,80**	---------

Tabela 01: Radiância e sua evolução temporal. Indica a radiância em cada setor analisado para o ano de 2025, além da evolução temporal da mesma e comparações com o panorama geral do Parque Estadual da Serra do Brigadeiro.

A etapa final de investigação compreende da avaliação da contribuição da poluição luminosa das cidades do entorno sobre o Parque Estadual da Serra do Brigadeiro. Nessa etapa, foi elaborada uma análise considerando apenas os municípios localizados em um raio de até 50 km de determinado ponto de análise da unidade de conservação. Essa delimitação espacial permite contemplar as principais fontes potenciais de iluminação artificial que podem influenciar o céu noturno do Parque.
Neste estudo, foi adotado o Setor C, correspondente à área do Centro de Visitantes e imediações e um ponto de interesse relevante para as observações astronômicas noturnas. A estimativa da contribuição relativa de cada cidade foi obtida a partir de sua radiância (nW/cm^2) e da distância em relação ao Parque, utilizando-se o expoente $\alpha = 2,8$, valor considerado o mais representativo para as cidades do entorno, em função das distâncias envolvidas (Garstang, 1986).

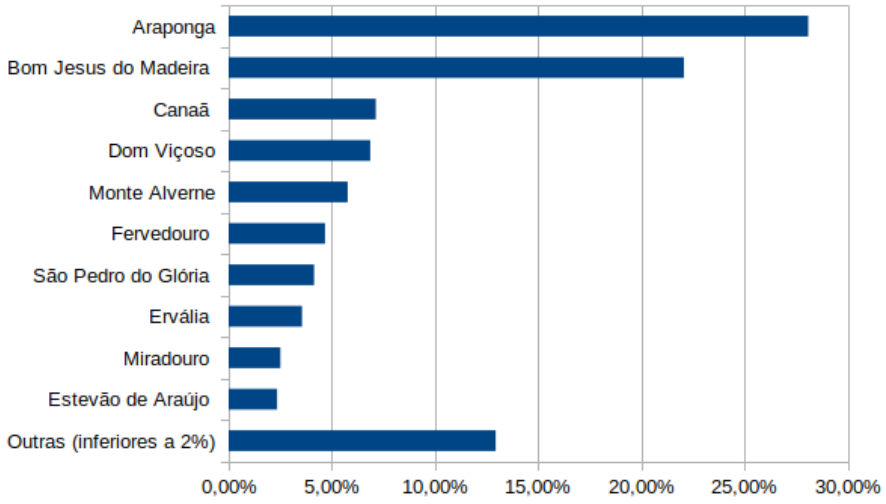


Figura 6: Fontes poluidoras. Contribuição relativa das cidades sobre o setor C.
Fonte: Autores

O gráfico da Figura 6 indica as contribuições das localidades de Araponga, Bom Jesus do Madeira, Canaã, Dom Viçoso, Monte Alverne, Fervedouro, São Pedro do Glória, Ervália, Miradouro, Estêvão de Araújo, Muriaé, Viçosa e São Francisco da Glória na composição da radiância incidente sobre o setor C. Embora algumas dessas localidades não apresentem, isoladamente, os maiores níveis absolutos de emissão luminosa, sua maior contribuição relativa está associada à menor distância em relação ao ponto de interesse, o que intensifica seu impacto conforme o modelo adotado. Destacam-se Araponga e Bom Jesus do Madeira

como as principais fontes de contribuição, seguidas por Canaã e Dom Viçoso em um nível intermediário. Esse padrão evidencia que a proximidade espacial exerce papel determinante na propagação da luz artificial até a área analisada, superando, em certos casos, a influência de centros urbanos mais intensamente iluminados, porém mais distantes. Dessa forma, os resultados indicam que a poluição luminosa no Parque Estadual da Serra do Brigadeiro é fortemente condicionada pelas cidades do entorno imediato, o que reforça a necessidade de estratégias de gestão e controle da iluminação nessas áreas para a preservação da qualidade do céu noturno.

Considerações Finais

O Parque Estadual da Serra do Brigadeiro é uma importante unidade com êxito na conservação ambiental. Possui em seu interior poucas instalações, como o centro de visitantes, brigada, alojamentos de pesquisadores, etc. Essas estão concentradas em uma pequena região de menos de 1,0 km², o que corresponde a menos de 0,7% de seu território total. Os poucos dispositivos de iluminação ocorrem apenas nessa pequena fração da reserva, que abrange o setor identificado como C. Ainda assim, o Parque sofre contribuição difusa de luz artificial proveniente do entorno, evidenciando uma intensificação da influência luminosa regional sobre o parque.

A investigação mostra que regiões mais ao norte do parque têm sofrido menos efeito da poluição luminosa, tendo os setores A, F e G como mais preservados que os demais. Isso se deve ao afastamento de cidades, distritos e comunidades. Na periferia oeste do setor F está situada a Fazenda Brigadeiro, setor desativado do Parque, mas com alto potencial para o astroturismo.

Há de se considerar que, embora todos os pontos indicados devam ser observados com cuidado por sua vulnerabilidade ambiental, o setor C requer um cuidado a mais, pois abriga as sessões astronômicas e de educação ambiental pela equipe do Instituto Astroparques. É também a localidade de mais fácil acesso, consequentemente de maior uso público. Neste setor, a concordância dos dados com o ajuste foi o mais baixo dentre os analisados, correspondendo a um coeficiente de determinação igual a 0,80, possivelmente por conta da variabilidade que se nota em seus poucos equipamentos de iluminação ao longo dos anos, como a troca ou retirada de lâmpadas por deterioração ou pela desativação de unidades do Parque. De forma inesperada, o único setor com instalações elétricas, apresenta, ainda assim, taxa de variação anual da radiância 6,1% inferior àquela do Parque como um todo. Também possui valor de radiância para o ano de 2025 de 2,4% abaixo desta referência. Esse fato, possivelmente explicado pela ausência de expansão de dispositivos de iluminação no interior do PESB, concorda com a suspeita de uma maior influência do exterior, onde o aumento da iluminação segue uma tendência, observada em toda parte, de difusão de novos dispositivos e sua expansão territorial.

Deve-se perceber, ainda, o alto impacto causado pela cidade de Araponga, situada a oeste. O setor B se coloca como o mais afetado e sensível, ameaçando a biodiversidade no Parque e as atividades de astroturismo. A taxa de avanço da radiância relativa ao Parque é a mais alta, 26,1%. Esse município, com menos de 8.500 habitantes, expõe claramente como as cidades, mesmo de pequeno porte, podem perturbar o ambiente natural, o que tem se intensificado ao longo dos anos.

Por outro lado, no que se refere à identificação dos causadores da poluição luminosa, é importante fazer ressalva sobre a escolha específica de um expoente para a equação (1). Usar uma função única com expoente intermediário é uma simplificação, mas que não compromete as conclusões obtidas. Verificações feitas com uso de outros valores, embora revelem em pequeno grau uma modificação na ordem de importância de fontes intermediárias e fracas de poluição luminosa, não indicam modificações significativas no grau de importância das principais cidades poluidoras, justificando o uso desse artifício ordinário.

É importante considerar ainda que a análise de contribuições refere-se especificamente ao setor C, sendo esse, apenas um dos pontos de interesse dentro do Parque. A ampliação deste estudo para outros setores ao longo da área do Parque Estadual da Serra do Brigadeiro mostra-se fundamental para uma compreensão mais abrangente da dinâmica da poluição luminosa na região. Nesse sentido, pretende-se, em etapas futuras de aprofundamento da pesquisa, aplicar a mesma metodologia empregada nesse setor para os demais pontos do Parque. Tal abordagem permitirá a construção de um panorama mais completo e integrado, contribuindo para análises comparativas entre diferentes áreas e subsidiando futuras ações de conservação.

Cabe salientar que as taxas absolutas de variação da radiância apresentam valores superiores ao observado em tendências globais. Contudo, sua interpretação deve ser feita com cautela, especialmente em regiões de baixa radiância, onde pequenas variações absolutas podem resultar em valores aparentes amplificados. Há de se considerar, ainda, que a pequena extensão territorial implica na redução da quantidade de dados (menor número de pixels) e, consequentemente, da robustez da estatística. Dito isso, deve-se apontar novamente o propósito do estudo. Mais do que revelar a tendência de aumento na radiância observada no interior e entorno da unidade de conservação, a investigação apresentada concentrou seus esforços na análise comparativa entre os diferentes setores. Isso possibilitou a indicação, de forma consistente, da maior influência luminosa nas bordas do Parque, em comparação às áreas centrais. Permite-se, dessa maneira, a identificação dos setores mais vulneráveis e revela o impacto provocado pelas diferentes origens.

Mais um alerta importante deve ser feito sobre o uso dos dados da plataforma Radiance Light Trends. Embora existam dados já disponíveis até o mês de abril de 2026, os recursos gráficos, como os mapas, não estão atualizados. Dessa forma, por mais que informações referentes ao ano de 2025 estejam presentes na pesquisa, as análises via recursos visuais limitam-se ao ano de 2024.

Embora a pesquisa apresentada observe alterações apenas em uma região de atuação e interesse específico, a Serra do Brigadeiro - MG, espera-se que o mesmo efeito seja notado em outros territórios, ressaltando a importância do presente trabalho para o enfrentamento da questão.

A poluição luminosa é um problema mundial, e que têm avançado a passos largos sobre diversos biomas e regiões do Brasil, mesmo aquelas não tão próximas a grandes centros urbanos. Além dos prejuízos à saúde e à biodiversidade, que por si só justificam a atenção dispendida, o efeito traz ainda outros infortúnios. Para a zona estudada restringe a exploração do turismo rural, do ecoturismo e do astroturismo, limitando as possibilidades de geração sustentável de renda em regiões carentes de oportunidades, nas quais o êxodo, especialmente de indivíduos mais jovens, é ainda uma realidade.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio de Janeiro (FAPERJ), por meio do Edital nº05/2025 - Jovens Talentos, e do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro (IFRJ), a partir do Edital Integrado nº01/2025. Conta, ainda, com apoio financeiro e logístico do Instituto Astroparques, Prefeitura Municipal de Fervedouro, Agência Caminhantes do Caparaó, Instituto Estadual de Florestas e da gestão do Parque Estadual da Serra do Brigadeiro.

Referências

DARKSKY INTERNATIONAL. Artificial Light at Night: State of the Science 2025. [S. l.]: DarkSky International, 2025. DOI: 10.5281/zenodo.15492393. Disponível em: https://zenodo.org/records/15492393. Acesso em: 29 abr. 2026.

Falchi, Fabio et al. The new world atlas of artificial night sky brightness. Science Advances, [s. l.], v. 2, n. 6, e1600377, 10 jun. 2016. DOI: 10.1126/sciadv.1600377.

Garstang, Roy Henry. Model for artificial night-sky illumination. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, v. 98, n. 601, p. 364-375, mar. 1986. DOI: 10.1086/131768.

g1. Parque Estadual da Serra do Brigadeiro pode ganhar título inédito e virar referência no astroturismo em MG. (07 de dezembro de 2025). Disponível: https://g1.globo.com/mg/zona-da-mata/noticia/2025/12/07/parque-estadual-da-serra-do-brigadeiro-pode-ganhar-titulo-inedito-e-virar-referencia-no-astroturismo-em-mg.ghtml. Acessado em: 27 de março de 2026.

Kyba, CCM, e al. (2015). High-resolution imagery of earth at night: New sources, opportunities and challenges. Remote Sensing, 7(1), 1–23.

Kyba, Christopher. Radiance Light Trends. Potsdam: GFZ German Research Centre for Geosciences, [s.d.]. Disponível em: https://lighttrends.lightpollutionmap.info/. Acesso em: 1 maio 2026.

Nicholls, S. Evidence for internal desynchrony caused by circadian clock resetting. Yale Journal of Biology and Medicine, 92(2):259–270, 2019.

OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS. OpenStreetMap [mapa]. [S.l.]: OpenStreetMap Foundation, [2026]. Disponível em: https://www.openstreetmap.org. Acesso em: 1 mai. 2026.

PAYNE INSTITUTE FOR PUBLIC POLICY. Earth Observation Group (EOG). Golden: Colorado School of Mines, [2026]. Disponível em: https://eogdata.mines.edu/. Acesso em: 1 mai. 2026.

Walker, Merle F. The effects of urban lighting on the brightness of the night sky. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, v. 89, n. 529, p. 405-409, jun. 1977.

DETECÇÃO DE PALMEIRAS EM FLORESTA OMBRÓFILA DENSA: USO DE DRONES E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

1 Thiago Bueno de Araújo, 2 Matheus Fortes Santos, 3 Angela Terumi Fushita
1 Universidade Federal do ABC, e-mail: thiagob.araujo@hotmail.com; 2 Universidade Federal do ABC, e-mail:matheus.fortes@ufabc.edu.br; 3 Universidade Federal do ABC, e-mail: angela.fushita@ufabc.edu.br

Palavras-chave: aprendizado de máquina, sensoriamento remoto, drone.

Resumo

A Mata Atlântica constitui um dos biomas mais ricos em biodiversidade do planeta, abrigando milhares de espécies endêmicas distribuídas em diferentes fitofisionomias. Apesar de sua elevada relevância ecológica, o bioma foi intensamente impactado desde o período colonial, em função de processos de ocupação e uso do solo, resultando em acentuada fragmentação e significativa redução de habitat. Atualmente, estima-se que restem aproximadamente 12% de sua cobertura original, predominantemente na forma de fragmentos isolados, o que compromete a conectividade ecológica, a dinâmica dos ecossistemas e a manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais. Diante desse cenário, a incorporação de tecnologias avançadas tem se mostrado fundamental para ampliar a capacidade de monitoramento, diagnóstico e suporte à tomada de decisão em ações de conservação e manejo ambiental. Ferramentas de sensoriamento remoto, associadas ao uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs), como drones equipados com sensores RGB, possibilitam a geração de ortomosaicos de alta resolução espacial. Esses produtos permitem a identificação detalhada de indivíduos arbóreos no dossel florestal, com elevado nível de precisão, viabilizando análises espaciais mais robustas. Quando integradas a técnicas de inteligência artificial, essas imagens se tornam base para análises automatizadas, como a detecção e classificação de espécies-chave, reduzindo o esforço manual e aumentando a eficiência dos processos de mapeamento. Nesse contexto, o presente estudo propõe a aplicação do algoritmo NetFlora, originalmente desenvolvido para a identificação automatizada de palmeiras na Amazônia, com o objetivo de avaliar sua aplicabilidade na detecção de palmeiras no bioma Mata Atlântica, a partir de imagens aéreas de alta resolução obtidas por drones. A proposta fundamenta-se na similaridade morfológica entre as copas das espécies de palmeiras presentes nesses biomas, buscando verificar a eficácia do algoritmo em um novo contexto ecológico. Para isso, a área de estudo foi mapeada em diferentes altitudes de voo, resultando na geração de ortomosaicos com distintas resoluções espaciais (GSD), com a finalidade de identificar as condições mais favoráveis ao desempenho do modelo. Os resultados obtidos indicaram que ortomosaicos com maior resolução espacial (menor GSD) apresentaram melhores índices de desempenho, alcançando até 75% de acurácia na identificação das palmeiras, quando comparados com dados de campo e com a vetorização manual da área. Esses resultados evidenciam a viabilidade da aplicação do algoritmo NetFlora na Mata Atlântica, demonstrando seu potencial como ferramenta para mapeamentos automatizados baseados em imagens RGB de alta resolução. Adicionalmente, destaca-se que o aprimoramento do algoritmo por meio de treinamento específico com espécies nativas da Mata Atlântica pode contribuir para o aumento da acurácia e da robustez dos resultados, ampliando sua aplicabilidade em estudos de monitoramento e conservação florestal. Dessa forma, o trabalho contribui para o avanço de metodologias inovadoras no uso de sensoriamento remoto e inteligência artificial, com potencial de aplicação em diferentes biomas e contextos ambientais, incluindo futuras aplicações em ambientes urbanos para detecção e monitoramento da vegetação.

Introdução

A Mata Atlântica corresponde a um bioma composto por diversas fitofisionomias como floresta ombrófila mista, floresta estacional semidecidual, floresta estacional decidual, campos de altitude, manguezais, restinga, refúgios vegetais, entre outros (COLOMBO e JOLY, 2010). Apesar de ser bioma mais ameaçado do Brasil, a Mata Atlântica continua sendo uma das regiões que mais provê serviços ecossistêmicos essenciais à sociedade, por exemplo, a vegetação florestal exerce ainda papel fundamental na estabilidade do solo, prevenindo erosão e deslizamentos, especialmente em áreas de relevo acidentado, que caracterizam grande parte do domínio atlântico (SCARANO, 2017). Estima-se que remanescentes florestais do bioma armazenem bilhões de toneladas de carbono, atuando como sumidouros importantes, sobretudo quando associados a projetos de restauração florestal em larga escala (REZENDE et al., 2018). Nos serviços de suporte, a Mata Atlântica mantém uma elevada diversidade genética e funcional, assegurando processos como a ciclagem de nutrientes, a formação do solo, a polinização e a dispersão de sementes, indispensáveis para a resiliência dos ecossistemas (JOLY et al., 2019).

Nesse cenário, a recuperação e conservação da Mata Atlântica assumem papel central para a manutenção e ampliação dos serviços ecossistêmicos. A implementação de políticas públicas integradas, aliada ao engajamento de comunidades locais e ao avanço de tecnologias de monitoramento ambiental, representa a base para assegurar que esse patrimônio natural siga sustentando tanto a biodiversidade quanto o bem-estar humano (PINTO et al., 2014; SCARANO, 2017).

O cruzamento de dados obtidos por sensoriamento remoto com sistemas de informação geográfica (SIG) permite a priorização de áreas para restauração com base em múltiplos critérios, como conectividade ecológica, proteção de nascentes e aptidão agrícola (BRANCALION et al., 2017). Técnicas de sensoriamento remoto possibilita a caracterização de estruturas florestais por meio de tecnologias como o LiDAR (Light Detection and Ranging), que fornece informações tridimensionais da vegetação. Essa técnica tem sido usada com sucesso para estimar a biomassa florestal e a heterogeneidade estrutural em áreas restauradas, contribuindo para avaliações mais precisas da recuperação ecológica (MARTINS et al., 2022).

O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs ou drones) tem revolucionado os métodos tradicionais de inventário florestal, oferecendo dados rápidos, de alta resolução e com menor custo operacional. Equipados com sensores RGB, multiespectrais ou LiDAR, possibilitam a mensuração indireta de variáveis dendrométricas, como altura, diâmetro e volume das árvores, além de fornecerem informações sobre densidade de regenerantes, cobertura do dossel e estrutura vertical da floresta (NEVALAINEN et al., 2017).

Recentemente, os avanços de IA têm sido incorporados às práticas de mapeamento, inventário e restauração florestal, especialmente na identificação automatizada de espécies vegetais, que têm demonstrado potencial na identificação de espécies nativas da Mata Atlântica com elevado grau de precisão (AMORIM et al., 2022). A integração de IA com dados geoespaciais e bancos de dados botânicos fortalece o monitoramento da biodiversidade e pode acelerar o diagnóstico florístico de áreas em restauração, contribuindo para projetos mais eficientes e cientificamente embasados (WEINSTEIN et al., 2019).

Uma das recentes metodologias desenvolvidas com o uso de inteligência artificial foi elaborada pelo Netflora, criada pela Embrapa Acre com apoio do Fundo JBS pela Amazônia, utilizando algoritmos treinados com IA (Machine Learning) para o manejo florestal sustentável em áreas específicas da Amazônia, com foco na identificação de espécies de valor econômico (EMBRAPA, 2023).A metodologia se baseia em um banco de dados de 40 mil hectares de floresta nativa mapeada com drones, a partir do qual são gerados ortofotos de alta resolução utilizados para treinar os modelos. Combinando informações botânicas e imagens aéreas, o Netflora permite identificar a localização de espécies arbóreas comerciais e palmeiras com alto grau de precisão, otimizando o planejamento do manejo e o inventário florestal, com menor custo e maior eficiência no Bioma da Amazônia (EMBRAPA, 2023).

Na Mata Atlântica e Amazônia, as palmeiras desempenham papéis ecológicos fundamentais, desde a estruturação da floresta até a provisão de recursos para fauna e comunidades humanas. Orfanó et al. (2023) destacam que a arquitetura piramidal e simétrica das copas de palmeiras do gênero *Syagrus* Mart., presentes em ambos os biomas, constitui um padrão visual robusto para modelos baseados em redes neurais convolucionais. Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo mapear, de forma automatizada, palmeiras no bioma Mata Atlântica, utilizando o algoritmo de identificação de palmeiras do NetFlora, originalmente desenvolvido para o bioma Amazônia, e avaliar como variáveis operacionais, como a altura de voo e a resolução espacial (GSD), influenciam o desempenho do modelo. A proposta se justifica pelo fato de que diversas espécies de palmeiras da Mata Atlântica apresentam características morfológicas semelhantes às espécies amazônicas, o que reforça o potencial de transferência e adaptação do algoritmo para este bioma.

Material e métodos

O estudo foi conduzido em área de Mata Atlântica caracterizada por floresta ombrófila densa, selecionada em função da presença de espécies da família Arecaceae e da complexidade estrutural do dossel, condição adequada para avaliação de métodos automatizados de detecção. A abordagem metodológica foi estruturada em quatro etapas principais: planejamento do levantamento, aquisição de dados em campo, processamento das imagens e aplicação do algoritmo de detecção.

O planejamento do aerolevantamento considerou parâmetros operacionais voltados à obtenção de imagens com diferentes resoluções espaciais, de modo a avaliar a influência do Ground Sample Distance (GSD) na performance do modelo. Foram definidos planos de voo com altitudes de 60 m, 80 m e 100 m, mantendo-se sobreposição longitudinal e lateral adequadas para reconstrução fotogramétrica, além da definição de rotas com cobertura total da área de interesse. Também foram considerados fatores como condições meteorológicas, incidência de luminosidade e ausência de ventos significativos, visando minimizar ruídos na aquisição dos dados e garantir qualidade radiométrica das imagens.

A execução do levantamento foi realizada por meio de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) equipado com sensor RGB, permitindo a captura de imagens de alta resolução espacial. Durante a operação, foram seguidos protocolos de estabilidade de voo e controle de velocidade, assegurando consistência na aquisição das imagens. Adicionalmente, foram coletados pontos de controle em campo e realizada verificação in loco (verdade terrestre) para posterior validação dos resultados, incluindo o registro visual das copas de palmeiras identificadas na área de estudo.

O processamento dos dados foi conduzido por meio de técnicas de aerofotogrametria digital, envolvendo etapas de alinhamento das imagens, geração de nuvem de pontos, construção de modelo digital de superfície (MDS) e geração de ortomosaicos georreferenciados. Os produtos gerados apresentaram variação no nível de detalhamento em função da altitude de voo, sendo observado aumento significativo no volume de dados à medida que a resolução espacial se tornava mais refinada. Os ortomosaicos resultantes constituíram a base para análise e aplicação do modelo de detecção automatizada.

A aplicação do algoritmo foi realizada utilizando o modelo NetFlora - PALMEIRAS_Embrapa00, que é baseado em técnicas de aprendizado de máquina treinadas para identificação de padrões morfológicos associados a espécies arbóreas. O algoritmo foi aplicado diretamente sobre os ortomosaicos gerados, realizando a detecção automática das copas de palmeiras com base em características geométricas e padrões visuais. A performance do modelo foi analisada por meio da comparação entre os resultados obtidos e os dados de campo, permitindo estimar a acurácia da classificação e identificar limitações associadas à resolução espacial e à complexidade do dossel florestal. Essa abordagem metodológica permitiu avaliar de forma integrada o potencial do uso de imagens obtidas por drone e algoritmos de inteligência artificial para detecção automatizada de espécies vegetais, considerando tanto aspectos operacionais quanto limitações técnicas relacionadas à aquisição e processamento dos dados.

Resultados e Discussão

Foram gerados ortomosaicos de alta resolução a partir de voos com drone em três altitudes (60, 80 e 100 m), utilizados como base para aplicação do algoritmo NetFlora (EMBRAPA, 2024), voltado à detecção automática de palmeiras no dossel

florestal. Os resultados processados estão representados nas Figuras 01 nas quais os pontos identificados automaticamente pelo algoritmo foram sobrepostos aos ortomosaicos.

O NetFlora, originalmente desenvolvido para o bioma Amazônico, realizou a identificação de palmeiras com base em padrões morfológicos previamente treinados por inteligência artificial. Entre as espécies detectadas, destacam-se *Astrocaryum murumuru*, *Astrocaryum vulgare*, *Attalea maripa*, *Euterpe precatoria*, *Iriartea deltoidea*, *Mauritia flexuosa* e *Syagrus coronata*, distribuídas de forma variável entre as diferentes altitudes analisadas.

A quantificação dos indivíduos identificados encontra-se nas Tabelas 01. A partir desses dados, é possível analisar a predominância das espécies e avaliar o desempenho do algoritmo em diferentes resoluções espaciais. Os resultados com a aplicação do algoritmo NetFlora evidenciam a influência direta da resolução espacial na capacidade de detecção automatizada de palmeiras em ambiente de floresta ombrófila densa. A análise comparativa entre os ortomosaicos gerados em diferentes altitudes demonstrou variação significativa no número de indivíduos identificados, bem como na qualidade da classificação.

Foram detectados 46 indivíduos no ortomosaico gerado a partir do voo realizado a 100 metros de altitude, 60 indivíduos a 80 metros e 65 indivíduos a 60 metros, independentemente da espécie considerada. Para validação dos resultados, foi realizada verificação em campo (verdade terrestre), com base na análise detalhada dos ortomosaicos nos pontos indicados como ocorrência de palmeiras, conforme ilustrado na Figura 02. Esse procedimento permitiu aferir a confiabilidade da detecção automatizada e apoiar a interpretação dos resultados obtidos.

Na Figura 01, referente ao ortomosaico obtido a 100 metros, observa-se menor definição das estruturas vegetais, com redução na nitidez das copas e maior homogeneização do dossel quando comparado com resultado a 80m e 60 m. Esse efeito pode dificultar a identificação de padrões morfológicos característicos das palmeiras, como a simetria radial e a disposição das folhas, reduzindo a eficiência do algoritmo. Além disso, a sobreposição de copas e a presença de sombras contribuem para a geração de falsos negativos, uma vez que indivíduos presentes na área não são corretamente identificados pelo modelo, e conforme diminui a altura de voo o GSD aumenta e verifica-se melhora significativa na qualidade visual do ortomosaico.

Esse resultado confirma a relação direta entre o Ground Sample Distance (GSD) e a acurácia da classificação, evidenciando que menores valores de GSD favorecem a identificação automatizada ao permitir maior extração de atributos morfológicos e texturais. A validação em campo, apresentada na Figura 02, permitiu confrontar os resultados obtidos pelo algoritmo com a realidade observada, sendo estimada uma acurácia aproximada de 75% na identificação das palmeiras. Esse desempenho pode ser considerado satisfatório, sobretudo em função da complexidade do ambiente analisado, caracterizado por alta diversidade florística, sobreposição de copas e variações de iluminação. No entanto, a análise detalhada dos resultados indica a ocorrência de erros de classificação, incluindo tanto falsos positivos quando o algoritmo identifica como palmeira indivíduos de outras espécies ou falsos negativos, associados à não detecção de indivíduos presentes na área de palmeiras. Um fator relevante que influenciou a performance do modelo está relacionado ao fato de o algoritmo NetFlora ter sido originalmente treinado com dados do bioma Amazônico, o que pode limitar sua capacidade de generalização para outros contextos ecológicos, como a Mata Atlântica. As diferenças na estrutura do dossel, composição florística e padrões morfológicos das espécies podem reduzir a eficiência do modelo quando aplicado em ambientes distintos daquele para o qual foi calibrado. Esse aspecto reforça a importância de ajustes e treinamento do algoritmo com dados específicos do bioma de interesse, visando aumento da acurácia e robustez das classificações.

Além dos fatores relacionados à resolução espacial e ao treinamento do modelo, variáveis ambientais também influenciam os resultados. A presença de sombreamento intenso, variações topográficas e diferenças na reflectância das superfícies contribuem para a heterogeneidade radiométrica das imagens, dificultando a definição dos padrões utilizados pelo algoritmo. Em especial, áreas com copas parcialmente sobrepostas ou com estrutura irregular tendem a apresentar maior taxa de erro, evidenciando limitações do uso exclusivo de imagens RGB para esse tipo de aplicação.

Do ponto de vista operacional, observou-se que a melhoria na resolução espacial, obtida por meio da redução da altitude de voo, implica aumento significativo no volume de dados gerados. Ortomosaicos produzidos em menores altitudes apresentam maior densidade de pontos e maior tamanho de arquivo, o que impacta diretamente no tempo de processamento, na necessidade de capacidade computacional e no armazenamento. Esse cenário evidencia a existência de um trade-off entre qualidade da informação e viabilidade operacional, sendo necessário estabelecer critérios que equilibrem precisão e eficiência.

Dessa forma, a definição da altitude de voo deve considerar os objetivos do estudo. Para aplicações que demandam alta precisão, como inventários detalhados e monitoramento de espécies específicas, recomenda-se a utilização de menores altitudes, mesmo com maior custo computacional. Por outro lado, para análises em escala mais ampla, altitudes maiores podem ser adotadas, visando maior cobertura espacial e redução do volume de dados.

De maneira geral, os resultados demonstram que a integração entre imagens de alta resolução obtidas por drones e algoritmos de inteligência artificial apresenta elevado potencial para aplicação em inventários florestais automatizados. A metodologia proposta permite ampliar a eficiência na coleta e análise de dados, reduzir a dependência de levantamentos de campo extensivos e fornecer suporte à tomada de decisão em projetos de conservação e manejo florestal. Além disso, os resultados indicam que o aprimoramento do treinamento dos algoritmos, aliado à integração de diferentes tipos de sensores, pode contribuir para avanços significativos na acurácia e na aplicabilidade dessas tecnologias em diferentes contextos ambientais.

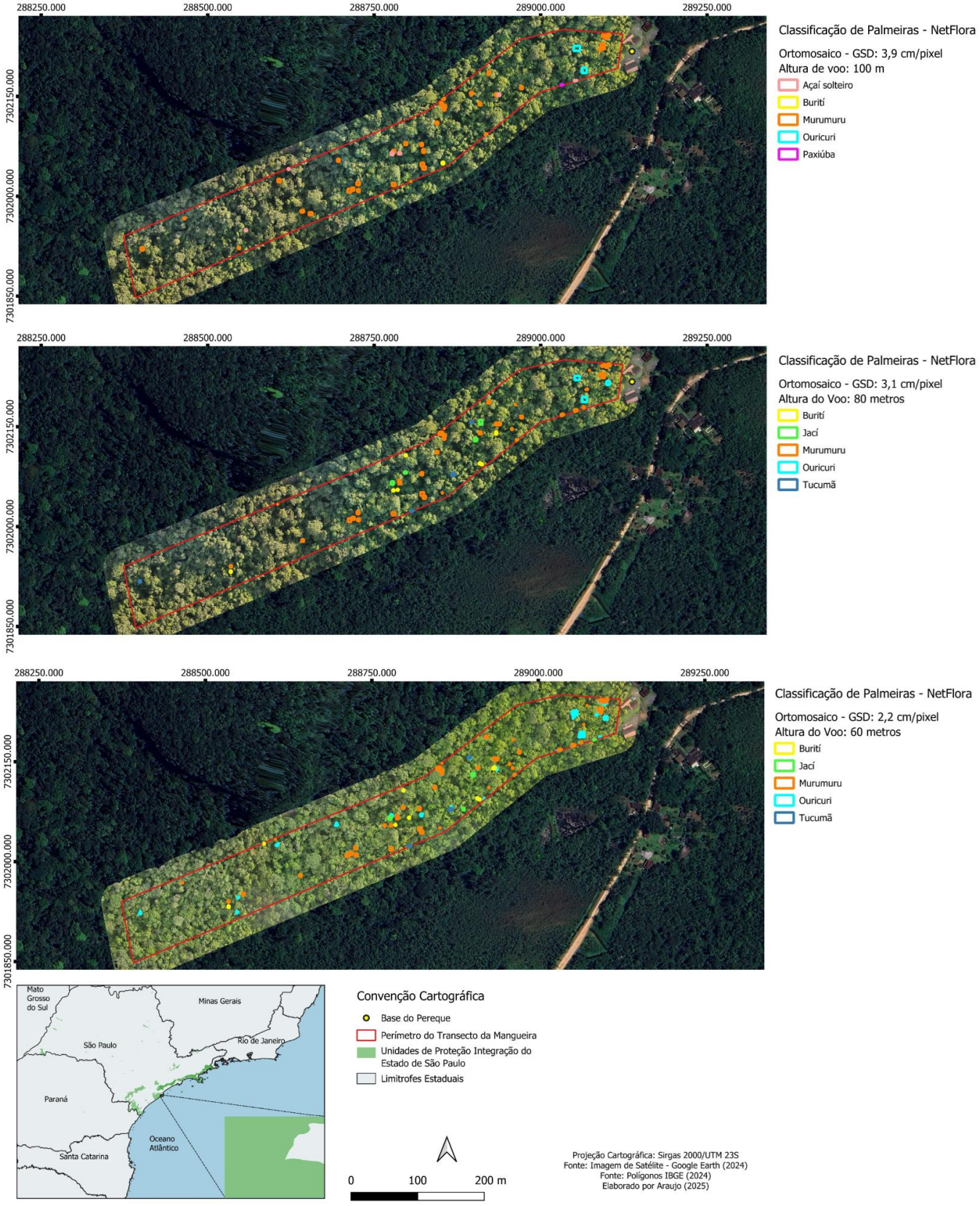


Figura 01:Classificação de Palmeira pelo algoritmo do Netflora com ortomosaico obtido com drone a 100, 80 e 60 metros.
Fonte: Araujo (2025).

100 m		
Espécies de palmeiras Amazônicas do banco de dados Netflora	**Espécies correspondente na Mata Atlântica**	**Número de indivíduos detectados**
Euterpe precatoria Mart. (Açaí solteiro)	-	6
(*Mauritia flexuosa* L.f.) Burití	*Cecropia pachystachya* Trécul (Embaúba)	1
Astrocaryum murumuru Mart. (Murumuru)	*Euterpe edulis* Mart. (Juçara)	36
Syagrus coronata (Mart.) Becc. (Ouricuri)	-	2
Iriartea deltoidea Ruiz & Pav. (Paxiúba)	-	1
Total		**46**

80m		
Espécies de palmeiras Amazônicas do banco de dados Netflora	**Espécies correspondente na Mata Atlântica**	**Número de indivíduos detectados**
Mauritia flexuosa L.f. (Burití)	-	7
Attalea maripa (Aubl.) Mart. (Jací)	*Cecropia pachystachya* Trécul (Embaúba)	4
Astrocaryum murumuru Mart. (Murumuru)	*Euterpe edulis* Mart. (Juçara)	42
Syagrus coronata (Mart.) Becc. (Ouricuri)	-	3
Astrocaryum vulgare Mart. (Tucumã)	-	4
Total		**60**

60 m		
Espécies de palmeiras Amazônicas do banco de dados Netflora	**Espécies correspondente na Mata Atlântica**	**Número de indivíduos detectados**
Mauritia flexuosa L.f. (Burití)	-	8
Attalea maripa (Aubl.) Mart. (Jací)	*Cecropia pachystachya* Trécul (Embaúba)	4
Astrocaryum murumuru Mart. (Murumuru)	*Euterpe edulis* Mart. (Juçara)	47
Syagrus coronata (Mart.) Becc. (Ouricuri)	-	3
Astrocaryum vulgare Mart. (Tucumã)	-	3
Total		**65**

Tabela 01: Quantificação de palmeiras detectadas pelo Netflora com ortomosaico a 100m, 80mm e 60m. Fonte: Araujo (2025)

Considerações Finais

A análise evidencia que a altura de voo e a resolução espacial exercem influência direta sobre o desempenho do modelo PALMEIRAS_Embrapa00 na detecção de palmeiras. A redução da altura de voo de 100 m para 60 m, com a consequente melhoria do GSD de 3,9 cm/pixel para 2,2 cm/pixel, resultou no aumento do número de indivíduos detectados (de 46 para 65). Esse incremento indica que imagens de maior resolução capturam com maior precisão atributos morfológicos da vegetação, ampliando a sensibilidade do modelo na identificação de alvos.

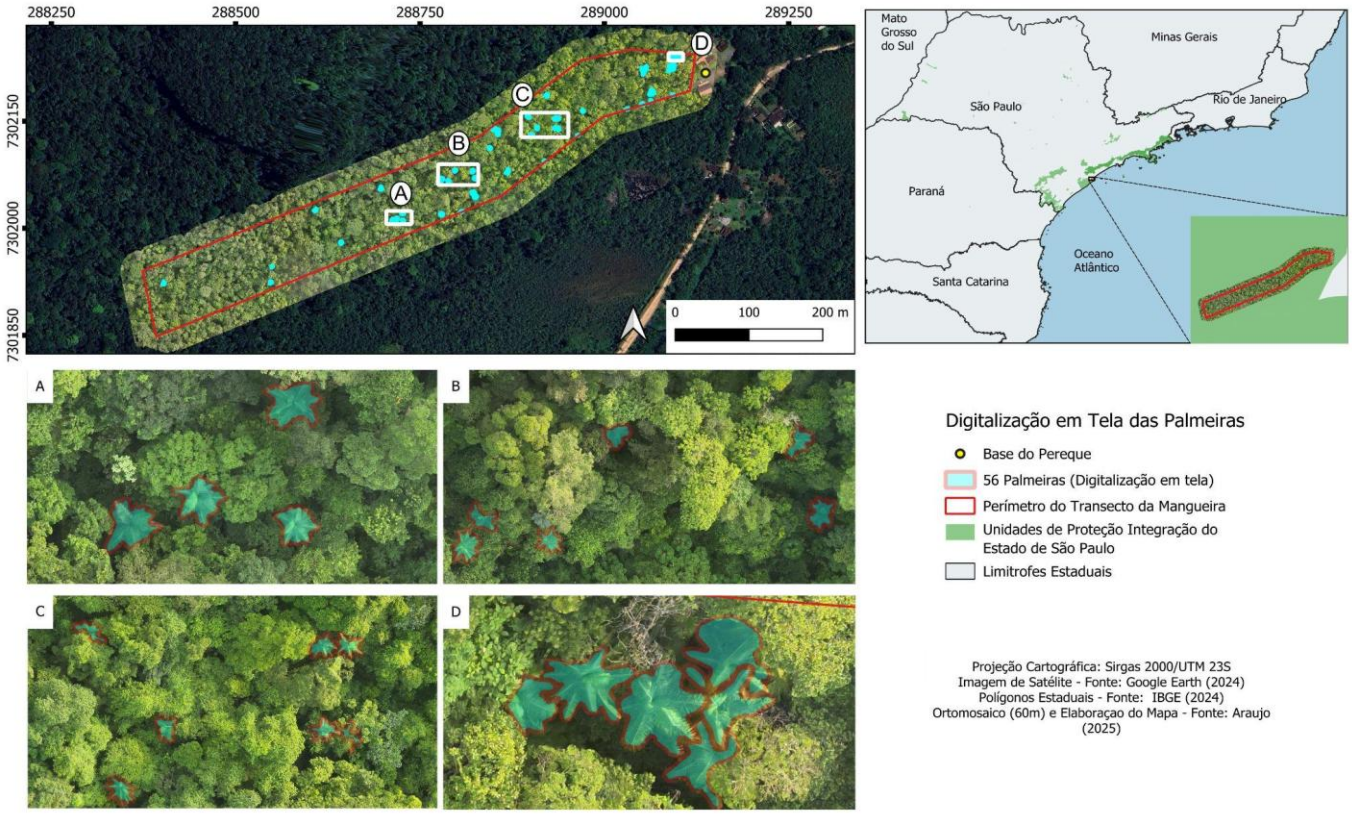


Figura 02: Digitalização em tela das palmeiras presente na área da Mangueira. As letras em destaque representam a posição dos exemplos. Fonte: Araujo (2025).



Figura 03:Exemplificação da identificação de palmeiras e de falso-positivo pelo algoritmo do Netflora com ortomosaico obtido com drone a 100 metros, 80 metros e 60 metros. As letras em destaque representam a posição dos exemplos. Fonte: Araujo (2025).

Entretanto, o ganho em detecção é acompanhado por um aumento expressivo de falsos positivos (de 5 para 24), o que impacta negativamente os indicadores de desempenho, como a acurácia global (redução de 73,2 % para 71,4 %) e o índice Kappa (de 0,7273 para 0,7091). Esses resultados demonstram que o aumento da resolução, embora favoreça a detecção, compromete a confiabilidade estatística do modelo, evidenciando que maior sensibilidade não implica, necessariamente, melhor desempenho global.

Adicionalmente, observa-se que, mesmo sem treinamento específico para a Mata Atlântica, o modelo apresentou substancial e viabiliza sua aplicação para mapeamentos preliminares. Deve-se considerar as diferenças florísticas e estruturais entre a Amazônia (bioma de origem do treinamento do modelo) e a Mata Atlântica. Do ponto de vista operacional, os dados indicam que o voo a 100 m representa a condição mais equilibrada, ao conciliar número de detecções, acurácia, taxa de falsos positivos e índice Kappa. Para aplicações que exigem maior robustez estatística, como inventários florestais e suporte à tomada de decisão, recomenda-se o aprimoramento do algoritmo com dados representativos do bioma de interesse.

Como perspectivas futuras, destaca-se a necessidade de treinamento com dados específicos da Mata Atlântica, visando aprimorar a detecção de espécies nativas e reduzir erros de classificação. Além disso, propõe-se o desenvolvimento de versões do algoritmo especializadas por bioma, aumentando sua capacidade de generalização controlada e precisão temática. Abordagens complementares, como a integração de sensores multiespectrais e a adoção de arquiteturas mais recentes de aprendizado profundo, também se mostram promissoras para lidar com a complexidade estrutural e a diversidade florística em escala regional.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Florestal do Estado de São Paulo pelo apoio em campo para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas.

AMORIM, B. S. et al. Deep learning for species identification: a case study with the Netflora tool in the Brazilian Atlantic Forest. Ecological Informatics, v. 69, 101644, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101644.

BRANCALION, Pedro H. S.; CHAZDON, Robin L. Beyond hectares: assessing the potential of forest restoration to mitigate biodiversity and carbon loss in tropical forests. Global Change Biology, [S.l.], v. 23, n. 8, p. 3152-3162, 2017. Disponível em: https://bioone.org/journals/tropical-conservation-science/volume-13/issue-1/1940082920910314/On-the-Need-to-Differentiate-the-Temporal-Trajectories-of-Ecosystem/10.1177/1940082920910314.pdf. Acesso em: 18 jul. 2025.

COLOMBO, A.F.; JOLY, C.A. MATA ATLÂNTICA. In: Câmara, I. B.; Fonseca, M. M. (Org.). Biodiversidade: conceitos, importância e conservação. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 2010.

EMBRAPA Acre. Netflora – Inteligência artificial (IA) para identificação de espécies florestais. Embrapa, 2024. Disponível em: https://www.embrapa.br. Acesso em: 27 jul. 2025.

EMBRAPA. Netflora: inteligência artificial no manejo florestal sustentável. Rio Branco: Embrapa Acre, 2023. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/430234/netflora. Acesso em: 25 jun. 2025.

JOLY, C. A. et al. Challenges and opportunities for biodiversity conservation in the Atlantic Forest. Perspectives in Ecology and Conservation, v. 17, n. 4, p. 193–200, 2019.

MARTINS, Maxence; PAILLET, Yohann; LARRIEU, Loïc; et al. Tree-related microhabitats are promising yet underused tools for biodiversity and nature conservation: a systematic review for international perspectives. Frontiers in Forests and Global Change, [S.l.], v. 5, p. 818474, 2022.
with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging. Remote Sensing, v. 9, n. 3, p. 185, 2017.

ORFANÓ, E. et al. Inteligência artificial aplicada ao mapeamento de espécies florestais na Amazônia. Embrapa Documentos, 2023. Disponível em: https://www.embrapa.br. Acesso em: 27 jul. 2025.

PINTO, S. R. R. et al. Governing and delivering a biome-wide restoration initiative: The case of Atlantic Forest Restoration Pact in Brazil. Forests, v. 5, p. 2212–2229, 2014.

REZENDE, C. L. et al. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. Perspectives in Ecology and Conservation, v. 16, n. 4, p. 208–214, 2018.

SCARANO, F. R.; CEOTTO, P. Brazilian Atlantic forest: impact, vulnerability, and adaptation to climate change. Biodiversity.

VALIDAÇÃO DE TEMPERATURA OBTIDA VIA SATÉLITE LANDSAT UTILIZANDO DADOS DE SUPERFÍCIE PARA O MUNICÍPIO DE UBERLÂNDIA-MG, NO PERÍODO DE 2011 A 2024

1 Ana Luisa de Oliveira Martins, 2 Roberto Terumi Atarassi, 3 Márcia Regina Batistela Moraes, 4 Samara Carbone

1 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: ana.martins3@ufu.br; 2 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: robertota@ufu.br; 3 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: marcia.batistela@ufu.br; 4 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail:samara.carbone@ufu.br;

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; Temperatura de Superfície; Validação de Dados.

Resumo

As Temperaturas de superfície (TSR) constituem ferramentas essenciais de análise em diversas áreas do conhecimento. Nesse contexto, o presente trabalho propõe validar as estimativas de Tse obtidas pelos sensores térmicos da série de satélites Landsat (7, 8 e 9), confrontando-as com dados observacionais coletados por estações meteorológicas no município de Uberlândia-MG. A pesquisa fundamenta-se no processamento de imagens do sensor Thermal Infrared Sensor (TIRS), envolvendo a conversão dos níveis de cinza em radiância espectral e, posteriormente, em temperatura de brilho. Para a obtenção da Ts real, aplicam-se correções de emissividade e correções atmosféricas.

A validação estatística é realizada por meio da correlação de Pearson, do Erro Médio Quadrático (RMSE) e do Erro Médio Absoluto (MAE) entre os valores extraídos dos pixels correspondentes às coordenadas das estações e às temperaturas registradas em solo no intervalo da passagem do satélite. Uberlândia representa um cenário de interesse devido à sua complexidade urbana e ao clima tropical sazonal com a alternância entre períodos secos e chuvosos. O objetivo central é identificar o grau de acurácia dos sensores Landsat para a região, determinando possíveis subestimativas ou superestimativas dos valores térmicos. Os resultados visam ajustar algoritmos de recuperação de temperatura em Uberlândia-MG, garantindo que o sensoriamento meteorológico remoto seja uma alternativa viável para a construção de uma série temporal de dados de superfície.

Introdução

Os estudos meteorológicos via satélite remontam à década de 1960, com o lançamento do satélite TIROS-1 pela National Aeronautics and Space Administration (NASA). Após o êxito na coleta de dados e o subsequente avanço na tecnologia de sensores, a NASA estabeleceu o projeto LANDSAT-1, pioneiro no monitoramento ambiental de recursos terrestres para fins civis. Atualmente, o programa LANDSAT destaca-se por possuir a maior série histórica de dados orbitais, superando 50 anos de monitoramento contínuo, embora seus sensores termais apresentem resoluções espectrais inferiores a sistemas mais recentes.

As estimativas de temperatura obtidas via satélite são amplamente utilizadas por sua aplicação multifacetada: no planejamento urbano, para o estudo do fenômeno das Ilhas de Calor Urbanas (CORRÊA et al., 2016); na agrometeorologia e gestão hídrica, por meio de modelos de balanço de energia como o SEBAL e o METRIC (BASTIAANSSEN et al., 1998; ALLEN et al., 2007); além de servirem como indicadores em estudos de desmatamento e na modelagem de riscos em saúde pública (REIS et al., 2020). Contudo, a precisão da Temperatura de superfície (Ts) derivada de sensores orbitais é condicionada a interferências atmosféricas (absorção e emissão), influência da vegetação e variações na ocupação do solo, fatores que alteram a emissividade da superfície (USGS,2024).

Para a validação desses dados, diversos estudos propõem a comparação entre a Ts orbital e as medições in situ de estações meteorológicas. Destacam-se trabalhos como o de Ataíde et al. (2009), que avaliaram dados do sensor MODIS (satélite AQUA) no estado de Goiás; Klering et al. (2007), com pesquisas que utilizam modelagem agrometeorológica-espectral para relacionar dados do sensor MODIS com redes de estações meteorológicas de superfície no Rio Grande do Sul; e Camparotto et al. (2013), que validaram dados de Temperatura da superfície do sensor MODIS no estado de São Paulo.

De acordo com a proposta teórica do Sistema Clima Urbano (S.C.U.) de Monteiro (1976), as variações térmicas observadas em municípios de médio e grande porte inserem-se no canal termodinâmico, onde a rugosidade urbana e a impermeabilização do solo redefinem o conforto térmico local. Complementarmente, o estudo de Oke (1987) demonstra que as alterações nas propriedades termofísicas da superfície e a geometria urbana modificam o balanço de energia local. Tais evidências mostram que a Temperatura de superfície no ambiente citadino não é meramente um fenômeno natural, mas um produto social que, nas últimas décadas, tem se configurado como um fator de segregação socioespacial (LOMBARDO, 1985).

O município de Uberlândia, Minas Gerais, possui a segunda maior população do estado e o 27° maior Produto Interno Bruto (PIB) do país (IBGE, 2023), configurando-se como um polo regional de industrialização e serviços. Segundo o Censo de 2022 (IBGE, 2023), a cidade integra o grupo de municípios de médio porte com expressivo crescimento demográfico. Sob a classificação climática de Köppen-Geiger, Uberlândia apresenta clima tropical com estação seca de inverno (Aw) (ALVARES et al., 2013). Diante da expansão urbana e do cenário de mudanças climáticas globais, o município torna-se um objeto de estudo relevante para a análise dos impactos da urbanização no campo térmico.

O presente trabalho propõe-se a comparar dados de satélites com medidas de temperatura do ar na superfície no município de Uberlândia-MG, visando identificar o grau de acurácia dos sensores Landsat para a região. O objetivo central é determinar possíveis subestimativas ou superestimativas dos valores térmicos para obter uma função de ajuste que permita calibrar os dados de satélite. Com esse refinamento dos algoritmos de recuperação de temperatura, busca-se garantir que o sensoriamento meteorológico remoto seja uma alternativa viável para a calibração e construção de séries temporais longas de dados de superfície.

Materiais e Métodos

Obtiveram-se dados de Temperatura de superfície (Ts) por meio da banda do infravermelho termal dos satélites Landsat 7, 8 e 9. Esses dados foram confrontados com medições pontuais de superfície oriundas da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e de três estações meteorológicas da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), gerenciadas pelo Complexo de Tecnologias Ambientais do Cerrado (CTAC). As estações da UFU localizam-se nas fazendas experimentais: Água Limpa, Capim Branco e Glória. A distribuição espacial dessas estações compõe uma malha amostral que permite uma análise abrangente do campo térmico do município de Uberlândia (MG), conforme demonstrado na Figura 01.

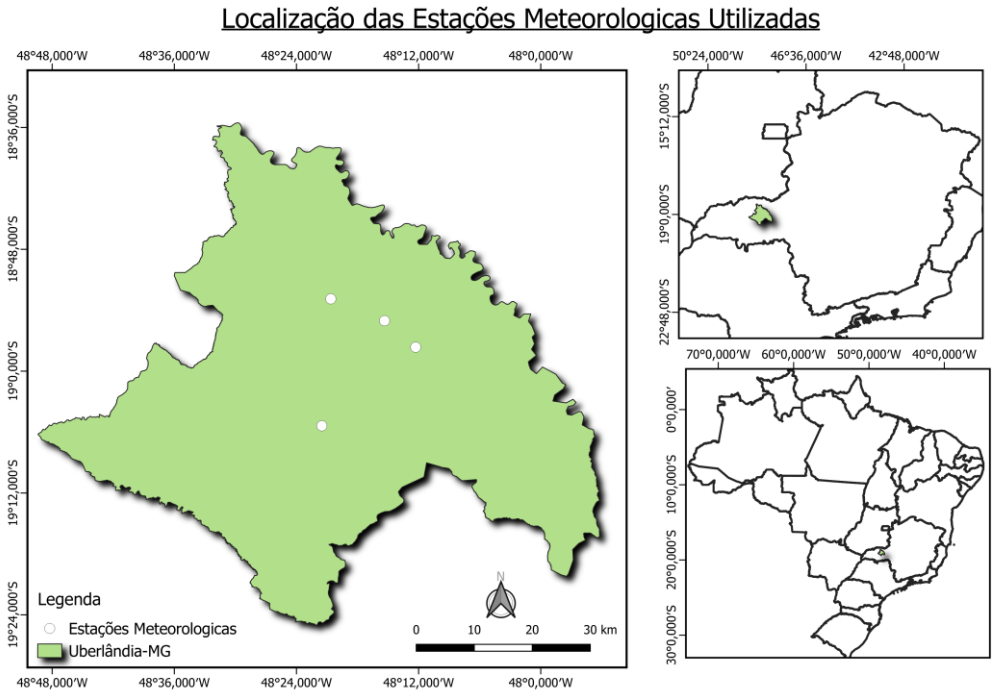


Figura 01: Localização das estações meteorológicas utilizadas na comparação com dados de satélite.
Fonte: Autoral (2026)

Foram coletados dados abrangendo o período de 2011, ano em que a primeira estação meteorológica da Universidade Federal de Uberlândia entrou em funcionamento, a 2024. Para refinar as análises, o escopo do estudo foi delimitado aos meses de junho a setembro. Essa escolha justifica-se por corresponder ao período de seca na região, o que favorece a análise ao reduzir a interferência da cobertura de nuvens sobre os dados orbitais.

Cada estação está inserida em um pixel cuja resolução espacial é de 60 metros para o Landsat 7 (reamostrado para 30m) e de 30 metros para os satélites Landsat 8 e 9. As imagens foram obtidas via plataforma *Earth Explorer*, vinculada ao *United States Geological Survey* (USGS). Os produtos termais utilizados contam com correções atmosféricas de Nível-2, que utilizam dados auxiliares para mitigar efeitos de absorção e emissão de gases e aerossóis. Além disso, aplicou-se a integração da emissividade da superfície baseada no produto *ASTER Global Emissivity Database* (GED) e no Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (do inglês Normalized Difference Vegetation Index - NDVI), derivado das bandas ópticas dos próprios satélites, para estimar a eficiência da superfície na emissão de radiação térmica e reduzir incertezas na leitura do sensor.

Os dados originais das imagens, expressos em radiância, foram convertidos em graus Celsius (°C) para equalização com o sistema de medidas das estações terrestres. Esse processo foi automatizado em linguagem Python, utilizando a biblioteca NumPy, por meio da ferramenta Calculadora Raster do software QGIS, conforme a Equação (01):

$$Tcésios = (B10 * MSF + AO) - 273{,}15 \qquad (01)$$

Onde: *B10* representa o valor do pixel da banda térmica, *MSF* (*Multiplicative Scaling Factor)* é o fator de escala multiplicativo e *AO* (*Additive Offset*) é o ajuste aditivo, constantes fornecidas nos metadados do satélite.

Para a extração dos valores dos pixels correspondentes às coordenadas geográficas das estações, desenvolveu-se uma rotina de automação utilizando a biblioteca Rasterio. O algoritmo identifica a localização exata de cada estação (Figura 02), extrai o valor térmico correspondente e gera uma planilha estruturada contendo a Temperatura da Superfície (Ts) e a data e horário exatos da passagem do satélite, totalizando 145 imagens registradas no período de interesse. Posteriormente, utilizou-se a biblioteca Pandas para correlacionar o horário de aquisição das imagens com o banco de dados das estações meteorológicas. Esse procedimento permitiu filtrar as temperaturas do ar registradas em solo dentro de um intervalo de até cinco minutos de diferença em relação à passagem orbital, garantindo a sincronia temporal dos dados.

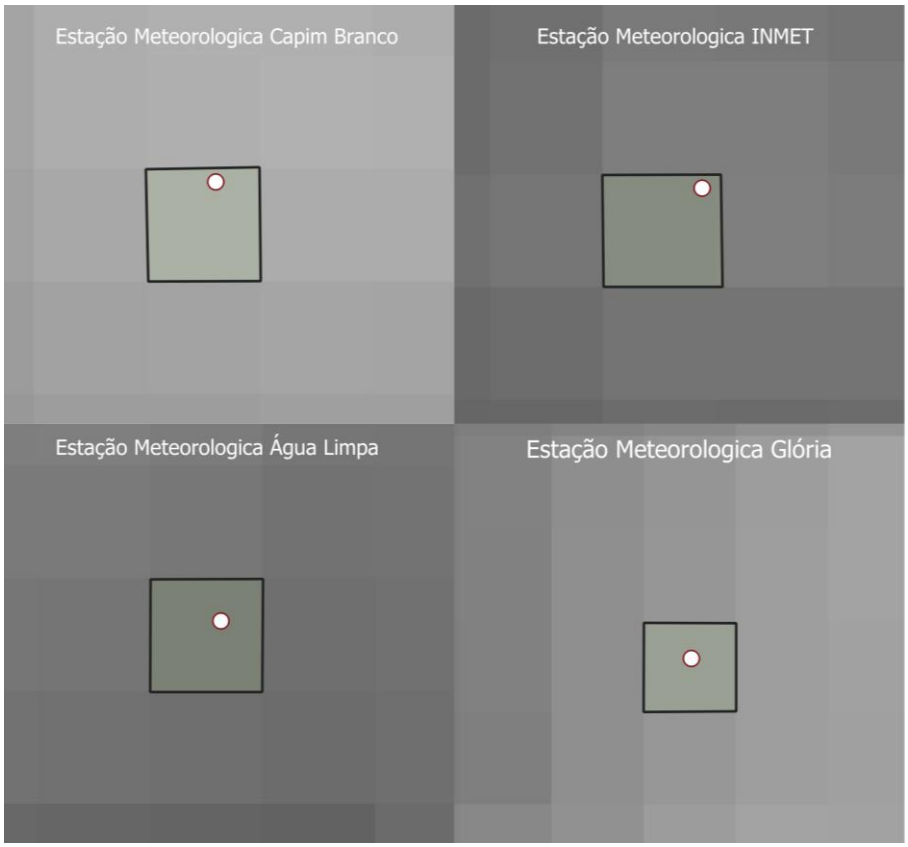


Figura 02: Exemplificação da localização das estações meteorológicas nos pixels.
Fonte: Autoral (2026)

Com o banco de dados consolidado, iniciou-se o processo de análise de consistência e tratamento de falhas (outliers), investigando anomalias térmicas (como valores inconsistentes com a realidade local). As imagens de satélite foram analisadas no intuito de determinar falhas ou presença de alterações devido à orbita do satélite e/ou falha nos sensores. Após a verificação de falhas, as datas que não possuíam erros de imagem foram comparadas com as datas de focos de incêndio na região do programa de queimadas do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE) chamado BDQueimadas. As datas que tiveram alteração devido a algum desses fatores foram removidas para garantir a qualidade estatística das análises e as funções comparativas. Ao final da análise de falhas, a amostra totalizou 73 pontos para a estação meteorológica Água Limpa, 103 pontos para a estação Capim Branco, 76 pontos para a estação Glória e 128 pontos para a estação meteorológica do INMET.

Por fim, a correlação entre a Temperatura de superfície (orbital) e a temperatura do ar (estação) foi avaliada por meio do método de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). Buscou-se o ajuste estatístico mais adequado (linear ou polinomial) para a nuvem de pontos. O método foi aplicado em conjunto com a técnica de Validação Cruzada (*Cross-Validation*), que testa a robustez do modelo em diferentes subconjuntos de dados, permitindo não apenas correlacionar as variáveis, mas estabelecer modelos de regressão com maior capacidade preditiva. Para facilitar a interpretação dos resultados e a análise das tendências térmicas, os dados foram graficados por meio da biblioteca Matplotlib, permitindo a visualização clara da dispersão dos valores e do comportamento das curvas de ajuste em relação às observações reais.

Resultados

Os resultados da validação da Temperatura de superfície (Ts) obtida via satélites Landsat 7, 8 e 9, comparados com os dados de Temperatura do ar (Tar) das estações meteorológicas em Uberlândia-MG, revelaram um desempenho estatístico consistente para o período de estiagem (julho a setembro). A aplicação do método de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) com ajuste linear permitiu identificar a dinâmica térmica entre a superfície e a atmosfera local (Tabela 01).

Estação	R^2	RMSE	Equação
Água Limpa	0,4558	4,52°C	y = (1.494530 * x) + (-6.804221)
Glória	0.6922	2,89°C	y = (1.445663 * x) + (-5.233044)
Capim Branco	0,5492	3,71°C	y = ((1.482571 * x) + (-5.567155)
INMET	0,5337	3,31°C	y = (1.414170 * x) + (-0.033925)

Tabela 01: Validação da Temperatura de superfície via Temperatura do ar em Uberlândia-MG no período de 2011-2024.

Os coeficientes de determinação (R^2) variaram entre 0,45 e 0,69, indicando que os sensores orbitais explicam mais de 45% da variabilidade térmica registrada em solo. O melhor ajuste foi observado na estação Glória (R^2= 0,69), seguida por Capim Branco (R^2= 0,55) e INMET (R^2= 0,53). A estação Água Limpa apresentou a maior dispersão dos dados, com um R^2 de 0,45

Essas disparidades decorrem, fundamentalmente, da localização geográfica das estações e do volume de dados disponível para análise. A estação Glória destacou-se pela alta consistência amostral, com registros a cada 5 minutos e baixo índice de falhas. Além disso, sua inserção em uma área de vegetação densa minimizou a interferência de fatores externos na temperatura local. Outro fator decisivo foi o seu posicionamento centralizado no pixel da imagem orbital, o que evitou distorções de borda.

Em contrapartida, as estações Água Limpa e Capim Branco — que operam em intervalos de 10 minutos — enfrentaram desafios distintos. Ambas estão situadas próximas a áreas de experimentação agropecuária, o que pode influenciar a microclima local. Especificamente, a estação Água Limpa registrou o menor volume de dados e a maior frequência de valores ausentes, comprometendo a robustez da amostra.

Por fim, a estação do INMET, apesar de apresentar o menor índice de falhas com dados em resolução horária, está localizada na região central do município de Uberlândia. Essa inserção urbana sujeita os registros aos efeitos da antropização e de alterações na refletância da superfície, o que mascara as variações térmicas naturais e justifica o ajuste intermediário obtido.O Erro Médio Quadrático (RMSE) manteve-se dentro de margens aceitáveis para estudos de sensoriamento remoto termal. A natureza não-linear do ajuste, evidenciada pelas curvas polinomiais, demonstra que a relação entre Ts e Tar não é directamente proporcional em toda as faixas térmicas, especialmente sob condições de alta radiância solar típicas do Cerrado mineiro no inverno.

A análise dos dados mostra que, em temperaturas elevadas, observou-se que a Ts orbital tende a exceder significativamente a Tar. Enquanto as estações registraram máximas próximas a 35°C, os sensores Landsat capturaram respostas de irradiação de superfície superiores a 45°C. Essa divergência é característica da estação seca, onde a baixa umidade do solo e a senescência da vegetação reduzem a evapotranspiração, elevando o calor sensível da superfície.

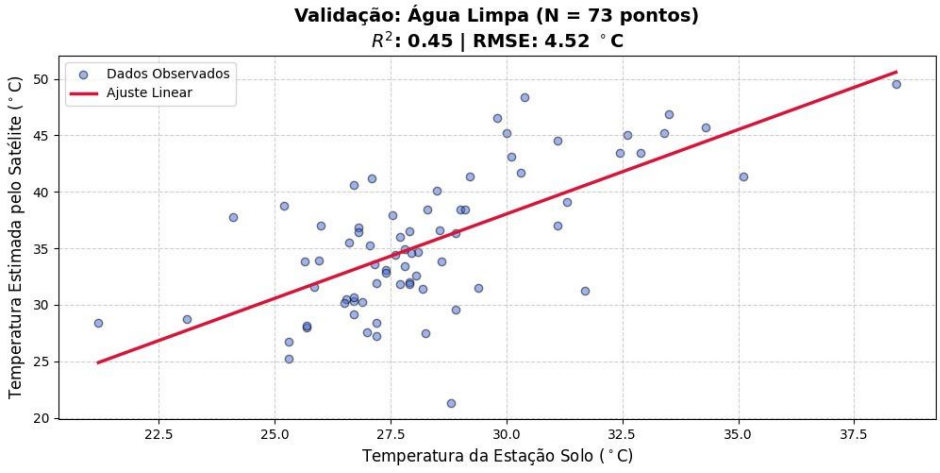


Figura 03: Gráfico de validação Estação Água Limpa, no período de junho a setembro dos anos de 2011 a 2024.
Fonte: Autoral (2026)

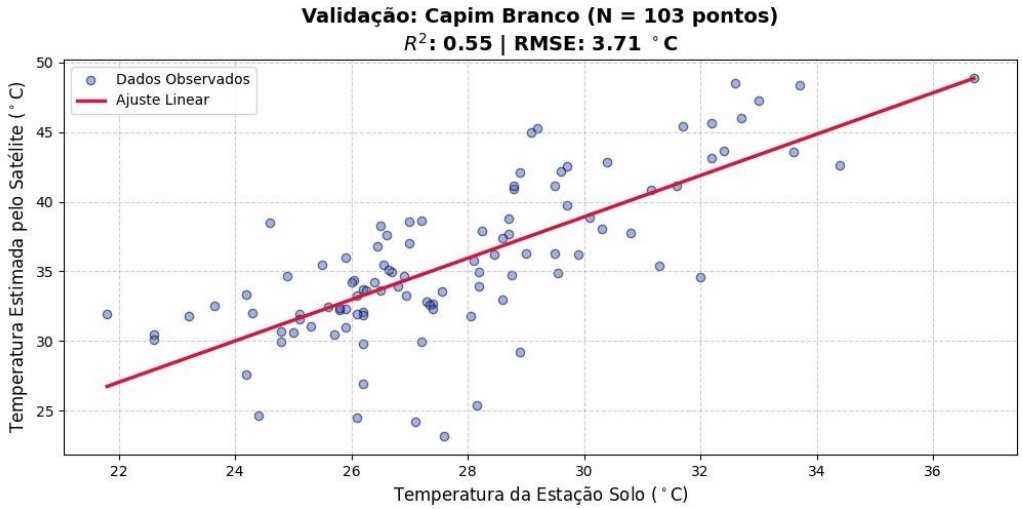


Figura 04: Gráfico de validação Estação Capim Branco no período de junho a setembro dos anos de 2011 a 2024.
Fonte: Autoral (2026)

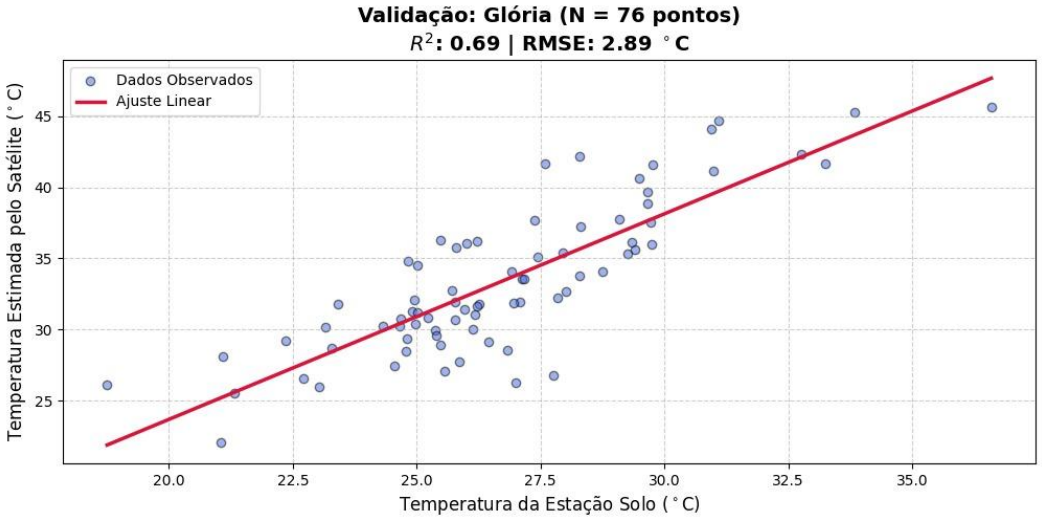


Figura 05: Gráfico de validação Estação Glória no período de junho a setembro dos anos de 2011 a 2024.
Fonte: Autoral (2026)

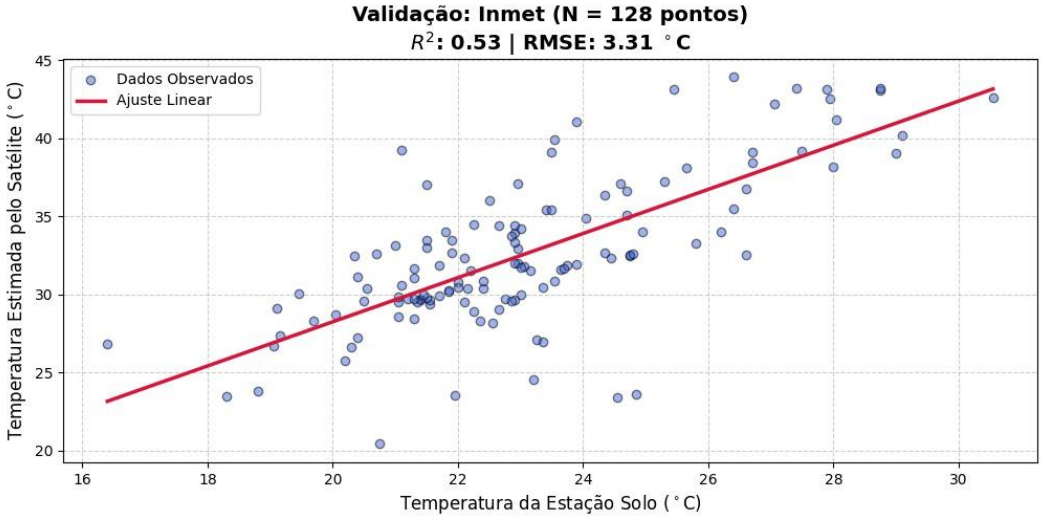


Figura 06: Gráfico de validação Estação INMET no período de junho a setembro dos anos de 2011 a 2024.
Fonte: Autoral (2026)

Comentários finais

O presente estudo cumpriu o objetivo de validar as estimativas de Temperatura de superfície (Ts) obtidas via satélite Landsat 7, 8 e 9 para o município de Uberlândia-MG nos 13 anos (2011-2024), demonstrando a viabilidade do uso de dados orbitais no monitoramento climático regional. Os coeficientes de determinação (R^2) situados entre 0,45 e 0,69 confirmam que os sensores termais do Landsat possuem uma correlação sólida com os dados terrestres, sendo ferramentas eficazes para o diagnóstico de ilhas de calor urbanas e monitoramento ambiental.

A estação meteorológica do Glória apresentou o melhor ajuste estatístico ($R^2 = 0,69$), evidenciando que a densa cobertura vegetal da localidade atua como um atenuador de fatores externos, como a ação dos ventos, que poderiam distorcer a temperatura registrada. Em contrapartida, a maior heterogeneidade e urbanização do entorno da estação INMET, somadas às lacunas nas séries históricas da estação Capim Branco, atuaram como fatores limitantes para a precisão estatística dos modelos.

No auge da estação seca (julho a setembro), a superfície atinge temperaturas consideravelmente superiores à temperatura do ar, com o satélite registrando picos acima de 45°C contra máximas de 35°C em solo. Essa disparidade reforça a importância da aplicação de modelos matemáticos para capturar a natureza dessa relação.

Não obstante os resultados satisfatórios, cabe ressaltar que o estudo delimitou-se ao regime de inverno (clima Aw), de modo que fatores como a nebulosidade estival, a variabilidade da umidade relativa, da velocidade do vento e as minúcias da morfologia urbana não foram integrados às análises estatísticas. Tais lacunas representam oportunidades para pesquisas futuras, que poderão utilizar modelos multivariados para refinar a estimativa da temperatura do ar em Uberlândia durante todo o ciclo anual.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Uberlândia, ao Complexo de Tecnologias Ambientais do Cerrado (CTAC) e, especialmente, aos servidores e colaboradores das fazendas experimentais que auxiliam na manutenção das áreas onde se localizam as estações meteorológicas, garantindo o apoio necessário para a realização deste estudo.

Referências Bibliográficas

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) — Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.

ALVARES, C. A. *et al*. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ATAÍDE, K. R. P. *et al*. Avaliação dos dados de temperatura do sensor MODIS (Satélite AQUA) no estado de Goiás. In: **ANAIS DO XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 2009, Natal. Anais... Natal: INPE, 2009. p. 3433-3439.

BASTIAANSSEN, W. G. M. *et al*. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 198-212, 1998.

CAMPAROTTO, L. B. *et al*. Validação de dados termopluviométricos obtidos via sensoriamento remoto para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 6, p. 665-671, 2013.

CORRÊA, P. B. *et al*. Estudo do Fenômeno da Ilha de Calor na Cidade de Manaus/AM: Um Estudo a Partir de Dados de Sensoriamento Remoto, Modelagem e Estações Meteorológicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 167-176, 2016.

GRUS, J. **Data Science do zero**: primeiras regras com o Python. Tradução de Welington Nascimento. 2. ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2021. 416 p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produto Interno Bruto dos Municípios 2023**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/. Acesso em: 18 abr. 2026.

IBGE. Censo Demográfico 2022. IBGE, 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html?t=resultados. Acesso em: 10 ago. 2024.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Dados Meteorológicos: dados históricos anuais. INMET, 2025. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos. Acesso em 23 fev. 2025.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **BDQueimadas**: Monitoramento de Focos. São José dos Campos: INPE, 2024. Disponível em: https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/. Acesso em: 18 jan. 2026.

KLERING, E. V. *et al*. Modelagem agrometeorológica-espectral para estimativa da temperatura do ar a partir de dados do sensor

MODIS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 10, p. 1365-1372, 2007.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de Calor nas Metrópoles**: o exemplo de São Paulo. São Paulo: Hucitec, 1985.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003. 311 p.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e clima urbano**. São Paulo: IGEOG-USP, 1976. (Série Teses e Monografias, n. 25).

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2. ed. London: Routledge, 1987.

REIS, I. C. *et al*. Combined use of land surface temperature and urban indicators to map the risk of dengue transmission. **Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical**, v. 53, 2020.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat 8-9 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide**. Version 6.0. Sioux Falls, SD: USGS, 2024. Disponível em: https://www.usgs.gov/. Acesso em: 20 abr. 2026.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2. ed. Amsterdam: Academic Press, 2006. 627 p.

SUSCETIBILIDADE A EVENTOS DE INUNDAÇÃO COMO SUBSÍDIO AO PLANEJAMENTO URBANO: ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA BACIA DE CONTRIBUIÇÃO DO CANAL DO GRANJEIRO, CRATO-CE

1 Erika Alves de Meneses, 2 Diogo Henrique Fernandez da Paz, 3 Maria Clara dos Santos Sousa, 4 Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello

1Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: erika.meneses@ufpe.br; 2Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: diogo.paz@cabo.ifpe.edu.br; 3Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: mariarocha.silva@ufpe.br ; 4Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: isabelamcbello@hotmail.com

Palavras-chave: AHP; Análise multicritério; Cariri; SIG.

Resumo

A intensificação de eventos de inundação em áreas urbanas tem se configurado como um dos principais desafios para o planejamento territorial, especialmente em cidades marcadas por crescimento desordenado e elevada impermeabilização do solo. Apesar dos avanços no uso de geotecnologias, ainda se observa a necessidade de estudos aplicados em escala local que integrem múltiplos fatores físicos e antrópicos para a identificação de áreas suscetíveis, sobretudo em bacias urbanas de médio porte no semiárido brasileiro. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a suscetibilidade a eventos de inundação na bacia de contribuição do canal do rio Granjeiro, no município do Crato–CE, como subsídio ao planejamento urbano. A metodologia baseou-se em uma análise multicritério em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o *software* QGIS 3.30, considerando as variáveis declividade, hipsometria, uso e ocupação do solo, pedologia e distância dos corpos hídricos. Os fatores foram reclassificados em uma escala de 1 a 10 e integrados por meio de álgebra de mapas, com pesos definidos pelo método AHP. Os resultados evidenciaram que as áreas de maior suscetibilidade se concentram nas porções de menor altitude, com relevo plano, alta densidade urbana e proximidade da rede hidrográfica, especialmente ao longo do canal do rio Granjeiro. Conclui-se que a interação entre fatores naturais e antrópicos intensifica o escoamento superficial e potencializa o risco de inundações, destacando a relevância da aplicação de ferramentas geotecnológicas como suporte ao planejamento urbano e à gestão de áreas de risco.

Introdução

Os eventos de inundação figuram entre os desastres naturais mais recorrentes e impactantes em escala global, sendo responsáveis por expressivos danos socioeconômicos e ambientais, especialmente em áreas urbanas. Nas últimas décadas, observa-se uma intensificação desses eventos, frequentemente associada tanto às mudanças climáticas quanto à expansão urbana desordenada, que altera significativamente os processos hidrológicos naturais (IPCC, 2021; UNDRR, 2022). No contexto urbano, a impermeabilização do solo, a ocupação de áreas de várzea e a modificação dos cursos d'água contribuem diretamente para o aumento do escoamento superficial e da frequência de eventos de inundação (Zhang *et al*., 2022).

No Brasil, a problemática das inundações é intensificada pelo crescimento urbano acelerado e pela deficiência no planejamento da drenagem. Dados da ANA (2021) indicam aumento na frequência e intensidade de eventos hidrológicos extremos, enquanto estudos do INPE (2022) relacionam a expansão urbana à maior vulnerabilidade a desastres, evidenciando a necessidade de estratégias mais eficazes de monitoramento e gestão de riscos.

Nesse contexto, o mapeamento da suscetibilidade a inundações destaca-se como ferramenta essencial ao planejamento urbano, por integrar fatores físicos e antrópicos em análises espaciais. Diferentemente das abordagens puramente hidrológicas, esses modelos permitem uma compreensão mais abrangente da dinâmica das inundações e têm sido amplamente utilizados no suporte à tomada de decisão em políticas públicas (Souza et al., 2023; Silva; Almeida, 2021).

Entre as metodologias mais difundidas, destaca-se a análise multicritério em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), frequentemente associada ao método *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Essa abordagem permite atribuir pesos relativos aos diferentes fatores condicionantes, como declividade, hipsometria, uso e ocupação do solo, pedologia e proximidade da rede hidrográfica, integrando-os em um índice sintético de suscetibilidade (Arunprasad *et al*., 2023). Revisões recentes indicam que a combinação de SIG e AHP apresenta elevada eficiência na identificação de áreas suscetíveis, especialmente em bacias urbanas, onde a interação entre fatores naturais e antrópicos é mais complexa (Ferreira *et al.,* 2022; Pessoa Neto *et al*., 2023).

Apesar dos avanços metodológicos, observa-se que muitos estudos ainda apresentam limitações quanto à aplicação em escalas locais e à consideração de especificidades regionais, sobretudo em áreas inseridas no semiárido brasileiro. Nessas regiões, a variabilidade climática, associada às características geomorfológicas e aos padrões de uso e ocupação do solo, impõe desafios adicionais à modelagem da suscetibilidade a inundações (Moura *et al.,* 2021). Além disso, há uma lacuna na literatura no que se refere à aplicação de modelos multicritério em bacias urbanas de médio porte, onde os processos de urbanização ocorrem de forma heterogênea e frequentemente sem o devido planejamento.

O município do Crato, localizado na região do Cariri cearense, insere-se nesse contexto, apresentando condições propícias à ocorrência de inundações, especialmente nas áreas influenciadas pelo rio Granjeiro. A canalização desse curso d'água,

aliada à intensa urbanização e à impermeabilização do solo, tem contribuído para o aumento do escoamento superficial e para a recorrência de episódios de extravasamento, conforme apontado por estudos locais (Silva, 2013), cuja problemática persiste e se intensifica no cenário atual.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar a suscetibilidade a eventos de inundação na bacia de contribuição do canal do rio Granjeiro, por meio da aplicação de uma análise multicritério baseada no método AHP em ambiente SIG. Ao integrar variáveis físicas e antrópicas em escala local, a pesquisa busca contribuir para o avanço das análises de risco em áreas urbanas, fornecendo subsídios técnicos para o planejamento urbano e a gestão de áreas suscetíveis a inundações.

Material e Métodos

O município do Crato situa-se na porção sul do estado do Ceará, nas proximidades da Chapada do Araripe, em um contexto topográfico com cotas altimétricas variando de 396 a 966 metros. Sua área territorial compreende sub-bacias de grande relevância, entre elas as dos rios Granjeiro, Batateiras, Saco do Lobo e Constantino, cujos cursos hídricos atravessam diferentes partes da malha urbana. Nesse contexto, as características do relevo associadas às condições climáticas contribuem para a ocorrência recorrente de inundações, sobretudo nas áreas sob influência do rio Granjeiro.

A área analisada tem como principal curso d'água o rio Granjeiro, com extensão aproximada de 11,7 km, que percorre a região central da cidade por meio de um canal inserido em área fortemente urbanizada. O estudo concentra-se nas principais sub-bacias urbanas do município do Crato, abrangendo as sub-bacias dos rios Granjeiro e Batateiras com o intuito de avaliar os riscos de inundação nessas áreas (Figura 01).

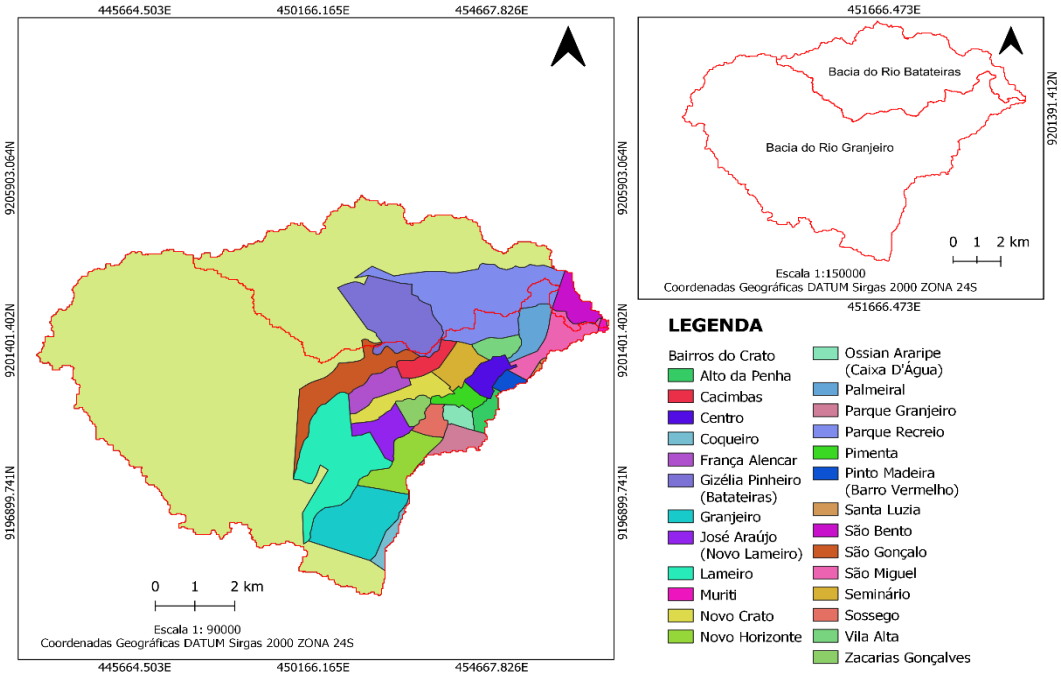


Figura 01: Localização das áreas urbanizadas nas bacias de estudo.
Fonte: Autores (2026)

As bacias em estudo apresentam elevado grau de urbanização, sobretudo em razão da presença de bairros com alta densidade de ocupação. No caso da bacia do rio Granjeiro, destaca-se a existência de um canal que atravessa diversos bairros da área urbana, inserido em um contexto de intensa impermeabilização do solo e forte adensamento populacional.

O curso principal do rio apresenta extensão de 15,4526 km e, em conjunto com seus afluentes, compõe uma rede de drenagem que totaliza 86,4947 km. Entre os principais afluentes do rio Granjeiro, destaca-se o Canal Granjeiro.

O Canal do rio Granjeiro constitui uma das principais estruturas de drenagem urbana do município do Crato, conduzindo o escoamento de parte significativa da bacia em um trecho fortemente urbanizado da cidade. Estudos apontam que a canalização do curso d'água, associada à intensa impermeabilização do solo e à ocupação das margens, contribuiu para o aumento do escoamento superficial e para a recorrência de episódios de extravasamento e inundação na área central (Silva, 2013).

a) Procedimentos Metodológicos

Para delimitar as áreas mais propensas à ocorrência de inundações na bacia do rio Jiquiá, foi utilizada uma adaptação da metodologia proposta por Pessoa Neto et al. (2023), aplicada anteriormente na bacia do rio Tejipió. O processamento e a análise dos dados espaciais foram realizados no QGIS 3.30, considerando como variáveis principais a declividade do terreno, a altitude, o uso e ocupação do solo, a proximidade dos corpos hídricos e a pedologia. O fator precipitação não foi incorporado nesta etapa, principalmente em razão da escala reduzida da sub-bacia estudada e da limitação de dados disponíveis para esse tipo

de análise. As informações altimétricas foram obtidas por meio do Modelo Digital de Elevação disponibilizado pelo TOPODATA, em formato raster. A partir desse material, foi gerado o mapa de declividade com auxílio das ferramentas do próprio QGIS. Já os dados de uso e ocupação do solo foram extraídos da base cartográfica da Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, que reúne arquivos vetoriais contendo informações sobre APPs, hidrografia e cobertura da terra dos municípios brasileiros.

No caso da pedologia, os dados foram obtidos no Banco de Dados e Informações Ambientais do IBGE. Para a hidrografia, adotou-se inicialmente a base disponibilizada pela FBDS, mas foi necessário realizar uma etapa de conferência e ajuste com apoio do complemento OSM *Downloade*r, disponível no QGIS.

Após a organização dessas informações, cada variável foi reclassificada com valores de 1 a 10, conforme o grau de contribuição para a suscetibilidade a inundações. Dessa forma, as classes e distâncias associadas a cada parâmetro receberam pontuações específicas, apresentadas na Tabela 01, que sintetiza os critérios adotados para a elaboração do mapeamento da suscetibilidade nas bacias dos rios Granjeiro e Batateiras.

Fatores	Classes / Distâncias	Score	Fatores	Classes / Distâncias	Score
Declividade (%)	0,00 - 3,00	10	Pedologia	Área Urbana	10
	3,00 - 8,00	8		Água	10
	8,00 - 20,00	4		Solos de Mangue	9
	20,00 - 45,00	2		Gleissolos	7
	> 45,00	1		Argissolos	7
Hipsometria (m)	396,00 - 398,50	10		Neossolos	4
	398,50 - 403,00	9		Latossolos	1
	403,00 - 423,50	7	Uso e ocupação do Solo	Área Artificial	10
	423,50 - 473,50	5			
	473,00 - 548,50	4		Corpo Hídrico	10
	548,50 - 648,50	3			
	648,50 - 773,50	2		Mangue	9
	773,50 - 898,50	1		Solo Exposto	7
	898,50 - 966,00	1		Agropecuária	7
Distância dos corpos hídricos (m)	0,00 - 150,00	10			
	150,00 - 300,00	8		Vegetação Campestre	3
	300,00 - 500,00	3			
	>500,00	1		Vegetação florestal	1

Tabela 01: Classificação dos parâmetros considerando os diferentes níveis de suscetibilidade à inundação. Fonte: Adaptado de Pessoa Neto *et al.* (2023).

Nos dados vetoriais, correspondentes às camadas de pedologia, distância aos corpos hídricos e uso e ocupação do solo, a atribuição dos scores foi feita diretamente na tabela de atributos de cada arquivo. Para isso, criou-se um novo campo em cada camada, no qual os valores foram preenchidos com o auxílio da ferramenta Calculadora de Campo do QGIS. Já para as variáveis que originalmente se encontravam em formato raster, como hipsometria e declividade, os valores foram reorganizados por meio da ferramenta de reclassificação, de modo que cada pixel passasse a representar o score correspondente à sua classe.

Depois da padronização de todos os fatores em formato raster, procedeu-se à integração das variáveis por meio de álgebra de mapas, utilizando a Calculadora Raster do QGIS. Nessa etapa, cada camada foi multiplicada pelo respectivo peso de importância, definido por Pessoa Neto *et al.* (2023) com base no método AHP, e, posteriormente, os resultados foram somados para gerar o índice final de suscetibilidade à inundação.

Assim, a Equação 01 apresenta a formulação utilizada para o cálculo do índice adaptado nesta pesquisa. Nessa adaptação, o parâmetro relacionado à variabilidade espacial da precipitação foi retirado da composição do modelo, sendo os pesos redistribuídos entre os demais fatores considerados.

$$I_{si} = \omega_D \, x \, D + \omega_H \, x \, H + \omega_O \, x \, U + \omega_s \, x \, S + \omega_A \, x \, A \quad (01)$$

Onde:

I_{si} : índice de suscetibilidade às inundações;
D: score de declividade;
H: score da hipsometria;
U: score do uso e ocupação do solo;

S: score da pedologia;
A: score da distância dos corpos hídricos.
ω : peso de cada parâmetro.

Após o cálculo do índice final, o raster foi reorganizado em classes de suscetibilidade à inundação, conforme descrito na Tabela 02.

Classe	Score
Muito Baixa	0,0 a 2,0
Baixa	2,1 a 4,0
Média	4,1 a 6,0
Alta	6,1 a 8,0
Muito Alta	8,1 a 10

Tabela 02: Classificação dos níveis de suscetibilidade à inundação.
Fonte: Pessoa Neto *et al.* (2023)

Resultados e Discussão

A Figura 2 reúne os parâmetros considerados na análise, os quais serviram de base para a elaboração do mapa de suscetibilidade a inundações, incluindo: (A) hipsometria, (B) declividade, (C) uso e ocupação do solo, (D) pedologia e (E) distância dos recursos hídricos.

A declividade reforça esse comportamento, pois o predomínio de áreas planas a suavemente onduladas tende a reduzir a velocidade do escoamento e favorecer o acúmulo de água em períodos de chuva intensa. Estudos de suscetibilidade a inundações como o de Mira e Silva (2023) apontam que hipsometria e declividade estão entre os principais condicionantes físicos para a identificação de áreas vulneráveis, especialmente quando associadas ao uso do solo e à proximidade dos cursos d'água.

Quanto à pedologia, observa-se o predomínio do Argissolo Vermelho Eutrófico, com 49,009 km², equivalente a 55,3% da bacia, seguido do Latossolo Amarelo Distrófico, com 24,269 km², correspondente a 27,4%. Esses solos apresentam diferentes respostas quanto à infiltração e à retenção hídrica. Entretanto, nas áreas urbanizadas, a compactação e a impermeabilização reduzem a capacidade de infiltração, aumentando o volume de escoamento superficial. Esse efeito também é destacado na pesquisa de Jiaxin Li *et al*. (2024) que associam o crescimento das superfícies impermeáveis ao aumento da vazão de pico, do coeficiente de escoamento e da ocorrência de alagamentos urbanos.

O mapa de uso e ocupação do solo confirma a presença significativa de áreas antropizadas e edificadas nas porções centrais e mais baixas da bacia, justamente onde as condições topográficas já favorecem o acúmulo de água. Além disso, as áreas mais próximas à rede hidrográfica apresentam maior suscetibilidade, por estarem sujeitas tanto à concentração dos fluxos superficiais quanto ao possível extravasamento dos canais. Assim, os resultados indicam que o risco de inundação não depende de um único fator, mas da sobreposição entre relevo, solo, urbanização e drenagem natural, reforçando a necessidade de planejamento urbano e implantação de soluções adequadas de drenagem.

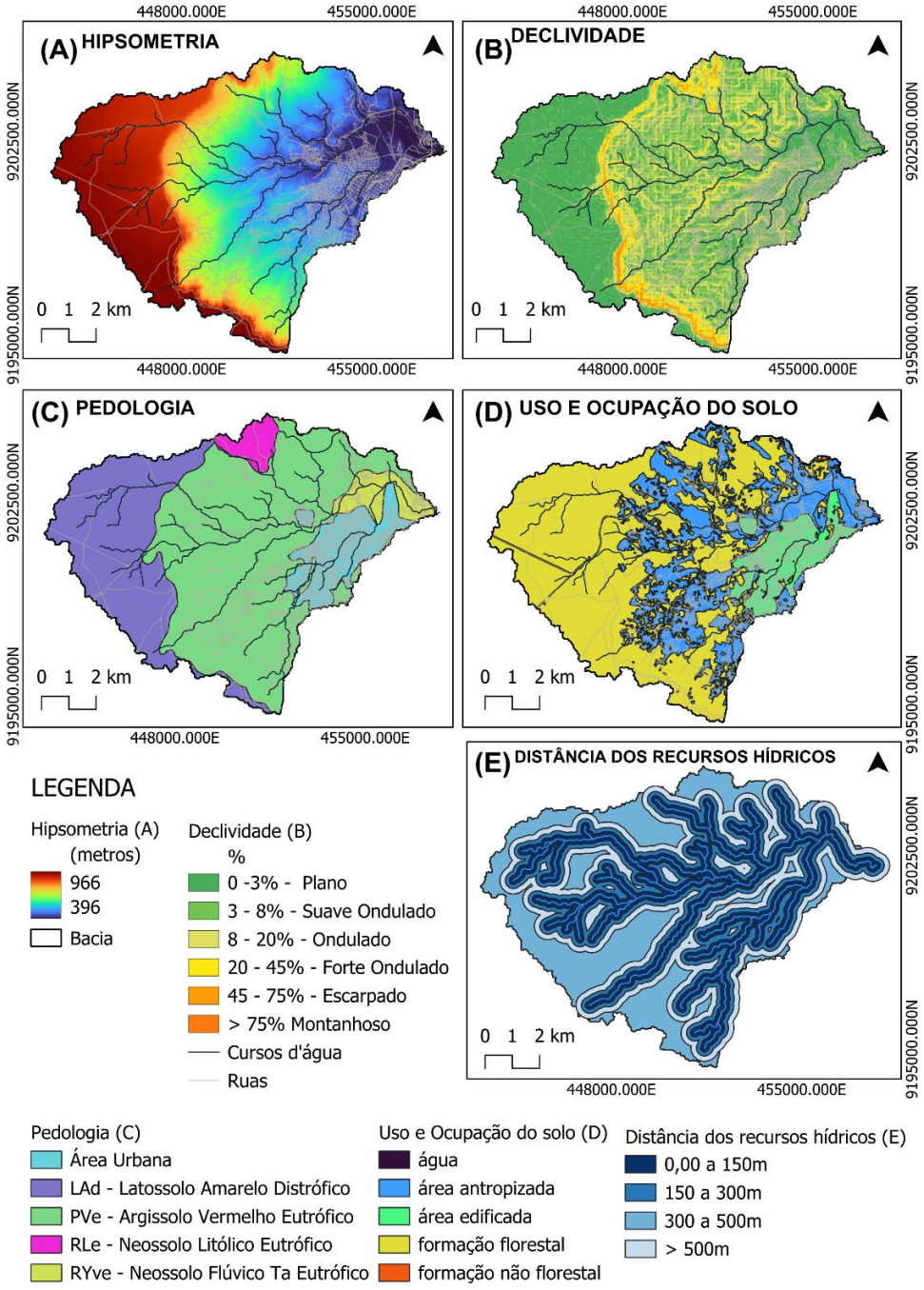


Figura 02: Fatores condicionantes avaliados para determinar a suscetibilidade a inundações.
Fonte: Autores (2026).

Assim, a análise integrada dos mapas temáticos indica que a suscetibilidade a inundações na bacia está relacionada, principalmente, à combinação entre baixa altitude, relevo plano, proximidade da rede hidrográfica e maior grau de urbanização. A hipsometria mostra um gradiente altimétrico bem definido, com cotas mais elevadas a oeste, associadas à Chapada do Araripe, e menores altitudes a leste, onde se localiza a área de saída da bacia. A configuração favorece o direcionamento natural do escoamento superficial das áreas mais altas para as regiões rebaixadas.

Com base nessa etapa, foi elaborado o mapa final de suscetibilidade a inundações nas bacias dos rios Batateiras e Granjeiro, apresentado na Figura 3, resultante da integração dos parâmetros por meio da álgebra de mapas, com a soma dos respectivos scores. A Tabela 3, por sua vez, sintetiza as classes de suscetibilidade identificadas, bem como suas áreas correspondentes e os percentuais de ocorrência na área de estudo.

Observa-se predominância de suscetibilidade média a baixa na bacia, enquanto as áreas de alta suscetibilidade concentram-se em regiões mais baixas e próximas à rede de drenagem, favorecendo o acúmulo de água. As áreas urbanizadas coincidem com essas zonas críticas, pois estão, em geral, em terrenos planos e impermeabilizados, o que intensifica o escoamento superficial e os alagamentos.

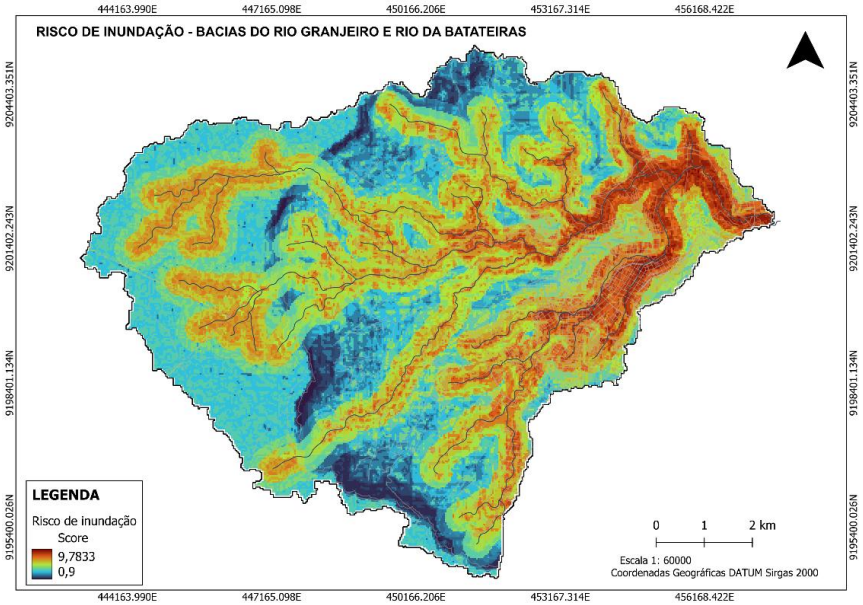


Figura 02: Mapa de suscetibilidade a inundações na bacia hidrográfica dos rios Granjeiro e Batateiras. Fonte: Autores (2026).

Suscetibilidade	Área (km²)	Taxa Percentual (%)
Muito Baixa	8,23	9,50%
Baixa	28,21	32,54%
Média	31,13	35,91%
Alta	16,82	19,41%
Muito Alta	2,29	2,64%
Total	**86,68**	**100,00%**

Tabela 03: Classes de suscetibilidade das bacias de estudo. Fonte: Autores (2026).

Embora as áreas de muito alta suscetibilidade sejam pouco representativas, correspondem a pontos de maior vulnerabilidade e exigem atenção prioritária. Os resultados evidenciam a influência conjunta de fatores naturais e antrópicos, reforçando a necessidade de planejamento urbano aliado a soluções eficientes de drenagem. A Tabela 4 apresenta a distribuição das áreas dos bairros inseridos na classe de suscetibilidade muito alta às inundações.

Bairros	Área do bairro dentro da bacia (km²)	Área de risco muito alto (km²)	Percentual do bairro em risco (%)
Alto da Penha	0,44	0,01	2,98%
Cacimbas	0,68	0,01	1,03%
Centro	0,72	0,21	29,58%
Coqueiro	0,38	0,00	0,00%
França Alencar	0,93	0,00	0,00%
Gizélia Pinheiro	3,55	0,08	2,23%
Granjeiro	3,12	0,00	0,00%
José Araújo	1,01	0,01	1,29%
Lameiro	4,35	0,01	0,28%
Muriti	0,07	0,04	51,47%
Novo Crato	1,17	0,01	1,11%
Novo Horizonte	1,54	0,00	0,21%
Ossian Araripe	0,40	0,01	3,51%
Palmeiral	0,97	0,16	16,03%
Parque Granjeiro	0,71	0,00	0,00%

Parque Recreio	5,96	1,01	16,91%
Pimenta	0,54	0,07	13,27%
Pinto Madeira	0,28	0,00	0,00%
Santa Luzia	0,05	0,00	0,00%
São Bento	0,84	0,21	24,67%
São Gonçalo	2,35	0,02	0,64%
São Miguel	1,32	0,29	22,05%
Seminário	0,95	0,01	1,40%
Sossego	0,52	0,01	1,72%
Vila Alta	0,57	0,05	8,55%
Zacarias Gonçalves	0,47	0,03	5,33%
Zona Rural	52,81	0,05	0,09%
Total	**86,68**	**2,29**	**-**

Tabela 04: Áreas de suscetibilidade muito alta em cada bairro pertencente às bacias do Rio Granjeiro e Batateiras.
Fonte: Autores (2026).

Com base nos dados apresentados, observa-se que os bairros Centro, Palmeiral e Parque Recreio concentram os maiores percentuais de áreas inseridas na classe de suscetibilidade muito alta às inundações, evidenciando maior vulnerabilidade nesses locais. No caso do Centro e do Palmeiral, essa condição está fortemente associada à influência do Canal do Granjeiro, que atravessa diversos bairros, como Pimenta, Vila Alta, Centro, Seminário e Palmeiral, atuando como principal eixo de condução dos fluxos superficiais. Destaca-se que as margens desse canal são, em grande parte, revestidas em concreto, o que reduz significativamente a infiltração da água no solo. Esse processo de impermeabilização contribui para o aumento do escoamento superficial e da velocidade de propagação das vazões, favorecendo a ocorrência de transbordamentos durante eventos de chuva intensa (Figura 03).



Figura 03: Canal do Rio Granjeiro.
Fonte: G1 CE (2021).

O bairro Parque Recreio apresenta elevada suscetibilidade devido à maior presença de cursos d'água, o que intensifica a concentração dos fluxos e o risco de inundação. Assim, a definição das áreas críticas está associada à combinação entre drenagem natural, infraestrutura e grau de urbanização.

Considerações Finais

A análise evidenciou que a suscetibilidade a inundações na bacia está diretamente associada à interação entre fatores naturais e antrópicos, com destaque para áreas de baixa altitude, relevo plano, elevada urbanização e proximidade da rede hidrográfica. Esses elementos favorecem o acúmulo e a rápida concentração do escoamento superficial, intensificando a ocorrência de eventos de alagamento. Os resultados indicaram predominância de classes de suscetibilidade média a baixa na bacia, porém com pontos críticos de alta e muito alta suscetibilidade concentrados em áreas urbanizadas e próximas aos cursos d'água, especialmente ao longo do canal do rio Granjeiro. Esses locais apresentam maior vulnerabilidade devido à impermeabilização do solo e à limitação da capacidade de drenagem.

Dessa forma, o estudo reforça a importância do uso de geotecnologias e da análise multicritério como ferramentas de apoio ao planejamento urbano, permitindo a identificação de áreas prioritárias para intervenção. A adoção de medidas estruturais e não estruturais de drenagem é essencial para mitigar os impactos das inundações e promover maior resiliência urbana.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pelo suporte institucional e acadêmico ao desenvolvimento desta pesquisa. Agradecem também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, fundamental para a realização deste estudo.

Referências Bibliográficas

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO.**Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021**. Brasília: ANA, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/ana. Acesso em: 7 abr. 2026.

ARUNPRASAD, P.; SINGH, S. K.; PANDEY, A.Flood susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis and AHP: a case study. **Sustainable Water Resources Management**, v. 9, n. 2, p. 1–15, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s40899-023-00687-3.

FERREIRA, C. S. S.; WALSH, R. P. D.; FERREIRA, A. J. D.Degradation in urban areas and its effects on flood risk: a review. **Land Degradation & Development**, v. 33, n. 5, p. 789–804, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/ldr.4178.

G1 CEARÁ. Canal do Rio Granjeiro vira correnteza com chuva de 110 milímetros e deixa ruas alagadas em Crato, no Cariri. 26 fev. 2021. Disponível em: https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2021/02/26/canal-do-rio-granjeiro-vira-correnteza-com-chuva-de-110-milimetros-e-deixa-ruas-alagadas-em-crato-no-cariri.ghtml. Acesso em: 01 maio 2026.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS.**Monitoramento de desastres naturais no Brasil: relatório técnico**. São José dos Campos: INPE, 2022. Disponível em: http://www.inpe.br. Acesso em: 7 abr. 2026.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE.**Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009157896.

LI, Jiaxin; ZHOU, Wuzhong; TAO, Cong. **The Impact of Urbanization on Surface Runoff and Flood Prevention Strategies**: A Case Study of a Traditional Village. Land, v. 13, n. 9, 1528, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/land13091528

MIRA, I; SILVA, M. **Mapeamento da suscetibilidade à inundação na bacia do Alto-Médio rios Mogi Guaçu e Pardo – MG.** Caderno de Geografia, v. 33, n. 74, p. 782–810, 2023. DOI: 10.5752/p.2318-2962.2023v33n74p782

MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.Variabilidade climática e impactos hidrológicos no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 29, p. 120–135, 2021. DOI: https://doi.org/10.5380/abclima.v29i0.78945.

PESSOA NETO, J. A.; SILVA, R. M.; SOUZA, F. A.Mapeamento da suscetibilidade a inundações utilizando AHP e SIG em bacias urbanas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 2, p. 745–760, 2023. DOI: https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.2.p745-760.

SILVA, R. M.; ALMEIDA, L. Q. Geotecnologias aplicadas à análise de risco de inundações urbanas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 3, p. 567–582, 2021. DOI: https://doi.org/10.14393/rbcv73n3-567.

SILVA, T. A. Modelagem hidráulica do canal do rio Granjeiro, Crato/CE, utilizando o programa computacional HEC-RAS. 2013. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

SOUZA, J. R.; OLIVEIRA, P. T. S.; MENDES, C. A. B.Multicriteria analysis applied to flood susceptibility mapping in urban basins. **Journal of Environmental Management**, v. 325, p. 116–130, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116130.

UNDRR – UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION.**Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2022**. Geneva: United Nations, 2022. Disponível em: https://www.undrr.org. Acesso em: 7 abr. 2026.

ZHANG, Y.; CHEN, X.; LI, J.Urbanization and flood risk: a global perspective. **Science of the Total Environment**, v. 830, p. 154–167, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154123.

ANÁLISE COMPARATIVA DOS FOCOS DE QUEIMADAS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS MOGI-GUAÇU E PARDO (2024-2025)

Ana Carolina Antunes Reis e Jacqueline Zanin Lima
Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP);
e-mail:anacarolina.antunes01@usp.br, jacqueline.zanin.lima@usp.br

Palavras-chave: BDQueimadas; Sistema de Informação Geográfica (SIG); Uso e Ocupação do Solo.

Resumo

No Brasil, o ano de 2024 foi marcado por uma das secas mais severas das últimas décadas, cenário que agravou a ocorrência de incêndios em regiões ambientalmente vulneráveis e com expressiva expansão agrícola. Nesse contexto, o presente estudo visa analisar a dinâmica dos focos de queimada e sua correlação com o uso e ocupação das bacias hidrográficas dos rios Mogi-Guaçu e Pardo, localizadas no estado de São Paulo. A metodologia utilizada fundamentou-se em técnicas de geoprocessamento em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), integrando dados de focos de calor extraídos do Banco de Dados de Queimadas (BDQueimadas) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e as classes de cobertura do solo fornecidas pela coleção 10.1 do projeto MapBiomas. Para a análise, adotou-se a Estimativa de Densidade de Kernel (KDE) para modelar superfícies contínuas e identificar áreas críticas de aglomeração de focos de incêndio. A análise focaliza o mês de agosto dos anos de 2024 e 2025, buscando avaliar a forma como a configuração territorial de ambas as bacias atua enquanto fator determinante para a severidade dos incêndios ocorridos. Os resultados indicaram uma transição drástica no comportamento do fogo entre os períodos analisados: enquanto agosto de 2024 apresentou um padrão de alta aglomeração, com superfícies de densidade contínuas e severas, o cenário de 2025 revelou uma distribuição fragmentada e dispersa, caracterizada por núcleos isolados e desconexos. Em 2024, a biomassa seca da monocultura permitiu o avanço ininterrupto do fogo, criando "corredores térmicos" que ameaçaram funções ecossistêmicas essenciais. Contudo, a fragmentação dos focos observada em 2025 indicou que o uso do solo, por si só, não explicava a magnitude do desastre, atuando como fator de risco crítico apenas quando associado a anomalias climáticas severas, como a estiagem extrema de 2024. Estes resultados visam a compreensão do comportamento espacial dos fenômenos e o fornecimento de subsídios técnicos e científicos para a formulação de estratégias de planejamento territorial, gestão ambiental e mitigação frente aos eventos extremos decorrentes das mudanças climáticas globais.

Introdução

No ano de 2024, o Brasil foi marcado pela seca mais severa dos últimos 70 anos, cenário em que inúmeros municípios vivenciaram condições climáticas extremas (CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS - CEMADEN, 2024). A constatação demonstra grande influência nos picos de incêndio registrados no país tendo em vista que, o déficit hídrico, combinado com elevadas temperaturas e baixa umidade do solo, favorece a formação de ambientes de maior propensão à propagação do fogo (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2023; PIVELLO et al., 2021). Nesse sentido, o estado de São Paulo registrou em março de 2024 um valor crítico (-1,94) no índice de Precipitação-Evapotranspiração Padronizado (SPEI), caracterizado como o pior em uma série histórica de 74 anos (CEMADEN, 2024). A intensidade do déficit hídrico visualizada ao longo do primeiro semestre de 2024 precede uma série de incêndios severos ocorridos em agosto do mesmo ano, onde os picos de incêndios ultrapassaram 3.500 ocorrências em um curto período de tempo (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE, 2024). Tais ocorrências desencadearam problemáticas em setores diversos, comprometendo tanto a estabilidade socioeconômica e a saúde pública quanto a integridade ecossistêmica regional.

Inseridas nessa conjuntura vulnerável, as bacias hidrográficas dos rios Mogi-Guaçu e Pardo, estabelecidas respectivamente como Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 09 e 04, constituem uma região de alta relevância agrícola e hidrológica da porção nordeste do estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2016). Ambas são caracterizadas por paisagens dominadas pelo setor sucroenergético, com dinâmica de uso e ocupação marcada por uma histórica expansão de monoculturas (ECOAGRI, 2006), que por sua vez, seguem representando a maior parte de seus territórios. A UGRHI 09 apresenta um uso agrícola consolidado que pressiona os diferentes fragmentos remanescentes de vegetação nativa de Mata Atlântica e Cerrado da área, enquanto a UGRHI 04 é marcada por desafios crescentes no gerenciamento de recursos hídricos devido ao elevado uso consuntivo estabelecido em diferentes regiões. Em suma, a configuração territorial de ambas as bacias hidrográficas demonstra a redução de fragmentos de vegetação nativa cercados por extensas áreas de produção de biomassa inflamável, estabelecendo assim um ambiente vulnerável à propagação de incêndios, quadro este que pode ser agravado quando associado a eventos climáticos extremos, como o ocorrido em 2024 (ALENCAR et al., 2024).

A magnitude e extensão dos incêndios de 2024 evidenciam a necessidade de compreender como o manejo territorial e as mudanças da cobertura do solo podem influenciar a resposta dos diferentes compartimentos ambientais frente a episódios extremos. Nesse sentido, o presente artigo visa realizar a análise comparativa dos focos de queimada nas UGRHIs 04 e 09, com recorte temporal centralizado no mês de agosto dos anos de 2024 e 2025. A análise foi elaborada em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando o *software* QGIS para o processamento espacial dos dados.

A relevância desta pesquisa fundamenta-se na necessidade de compreender as complexas interações entre a dinâmica de uso do solo e a recorrência de desastres ambientais no interior paulista. A importância do trabalho alinha-se diretamente aos

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, contribuindo para a gestão sustentável dos recursos hídricos (ODS 6), o fortalecimento da resiliência urbana frente a riscos tecnológicos e naturais (ODS 11) e a urgência de medidas de adaptação às mudanças climáticas (ODS 13). Ao evidenciar como a fragmentação florestal e a monocultura agrícola potencializam a vulnerabilidade da vida terrestre (ODS 15), este estudo visa fornecer subsídios técnicos e científicos que orientem o planejamento territorial e a conservação da biodiversidade nas bacias hidrográficas em questão, garantindo a manutenção de funções ecossistêmicas essenciais frente aos novos desafios climáticos globais.

Material e Métodos

A área de estudo compreende a UGRHI 04 (Rio Pardo) e a UGRHI 09 (Mogi-Guaçu), duas unidades de planejamento estratégico situadas no estado de São Paulo. A seleção dessas bacias como área de estudo fundamenta-se na representatividade de seus mosaicos agroindustriais e na recorrência de episódios críticos de queimadas, permitindo uma análise comparativa sobre a dinâmica espacial dos focos de calor. Ambas as unidades apresentam uma matriz de ocupação predominantemente antrópica, com o domínio da monocultura de cana-de-açúcar, onde remanescentes de vegetação nativa encontram-se altamente fragmentados. Além da relevância ambiental, a área de estudo engloba importantes pólos urbanos, como Ribeirão Preto (UGRHI 04) e Mogi-Guaçu (UGRHI 09), o que possibilita investigar a interface entre o risco de incêndios e os impactos socioambientais em zonas de alta densidade populacional.

A análise da dinâmica espacial das queimadas e sua correlação com o uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas dos rios Mogi-Guaçu e Pardo foi fundamentada em técnicas de geoprocessamento em ambiente SIG. Os SIGs dizem respeito a um conjunto de ferramentas que permitem a integração, armazenamento, gerenciamento e a análise de dados espaciais temporais de diferentes fontes e formatos, sendo essenciais para a compreensão de fenômenos ambientais e planejamento territorial (CALIJURI; CUNHA, 2013). Para a presente análise, adotou-se o *software* QGIS (versão 3.34.14), conhecido por apresentar um elevado desempenho em processamentos de dados geoespaciais e análises estatísticas (QGIS, 2022), garantindo assim, maior integridade técnica para a comparação sistemática dos anos de 2024 e 2025.

Procedimentos e Processamento de Dados

I. Sistema de Coordenadas e Parâmetros Técnicos

Para garantir a interoperabilidade e minimizar potenciais distorções espaciais na extensa área ocupada pelas UGRHIs 04 e 09 (CPRM, 2002), adotou-se o Sistema de Coordenadas Geográficas referenciado ao *datum* oficial do território brasileiro, SIRGAS 2000 (BORGES et al., 2015). Tendo em vista o sistema adotado, as medidas lineares da análise espacial foram convertidas para graus, assumindo 1°angular como sendo o equivalente à 111,319 km na superfície terrestre (CARVALHO; ARAÚJO, 2008).

II. Delimitação das Áreas de Interesse

A base vetorial com os limites político-administrativos foi obtida através da malha digital do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na escala 1:125.000. Para o processamento, foram aplicadas as operações: "Seleção por Feição", para o isolamento dos limites das UGRHI em camadas individuais, e "Recorte" (*Clip*), para a adequação da malha municipal aos limites. Tais processamentos possibilitaram a restrição da análise dos focos de calor e uso do solo para os perímetros das áreas de estudo.

III. Processamento Espacial dos Focos de Incêndio

O monitoramento de fogo no Brasil é centralizado no Programa Queimadas do INPE. O BDQueimadas, estabelecido pelo INPE, diz respeito a um sistema de processamento de dados de múltiplos satélites focalizado na identificação de focos de calor ativos. Para compor séries temporais consistentes ao longo dos anos, utiliza-se especialmente o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo do satélite polar de referência Aqua (TOMSHINSKI et al., 2011; WHITE; WHITE, 2016).

A análise de dispersão dos focos de incêndio foi dada pela implementação da Estimativa de Densidade de Kernel (KDE) para a geração dos mapas de calor (*heatmaps*) e identificação visual de "áreas quentes" (BOJKO, 2009; SANT'ANA et al., 2014; SOUZA NETO et al., 2021). Para o processamento dos dados em coordenadas geográficas (SIRGAS 2000), adotou-se um tamanho de pixel de 0,00018° (aproximadamente 20 metros) e um raio de busca (*bandwidth*) de 0,0718° (8 km) buscando equilibrar a resolução espacial e evitar a suavização excessiva da superfície analisada. Além disso, foi necessário a adoção de um *buffer* de 10 km (0,0898°) nos limites de ambas as áreas de estudo para mitigar os efeitos de borda estatísticos. Por fim, visando o destaque visual dos mapas de calor e a prevenção de interferências cromáticas indesejadas, utilizou-se o mapa de base *Dark Matter* (via *plugin QuickMapServices*), em conformidade com os princípios da comunicação cartográfica (SAMPAIO, 2019).

IV. Processamento Espacial do Uso e Ocupação do Solo

A análise da dinâmica de uso e ocupação do solo adotou a Coleção 10.1 do MapBiomas, que fornece mapas anuais da cobertura do solo baseados em imagens *Landsat* (com resolução original 30 metros) do período de 1985 a 2024, utilizando especificamente os dados referentes ao ano de 2024 (MAPBIOMAS, 2026; FRANCISCO et al., 2023). Para garantir a coerência matricial (CALIJURI; CUNHA, 2013), adotou-se o formato *raster* INT 16 (inteiro de 16 bits), como sendo o ideal para a manipulação dos códigos categóricos fornecidos sobre o uso do solo, bem como o tamanho do pixel foi configurado para 0,0002° (aproximadamente 22 metros), mantendo uma representação espacial fiel às transições e quebras de borda reais entre as áreas

naturais e antrópicas. Por fim, as categorias hierárquicas originais foram reagrupadas através da ferramenta "Reclassificar por Tabela", consolidando a análise em oito principais classes: "Floresta" (vegetação arbórea densa), "Vegetação herbácea e arbustiva" (formações campestres), "Agropecuária" (áreas agrícolas e pastagens), "Silvicultura" (plantios comerciais), "Área urbana" (infraestrutura e edificações), "Área não vegetada" (solos expostos e afloramento rochosos), "Corpos d'água" (rios e lagos), "Aquicultura" (tanques de criação aquática).

Resultados e Discussão

I. Análise comparativa dos focos de incêndio (2024-2025)

I.1. Bacia Hidrográfica do Rio Pardo (UGRHI 04)

O produto cartográfico (Figura 1) estabelece diferentes perspectivas acerca das superfícies de densidade de Kernel na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, promovendo o cenário comparativo do mês de agosto dos anos de 2024 e 2025. De modo geral, em agosto de 2024, a variação da coloração em tons de amarelo claro e branco demonstra que a altíssima proximidade geográfica entre as detecções criou uma massa crítica de ignições por unidade de área. Mesmo em locais onde o número absoluto de focos poderia ser menor que em anos históricos, a sua confluência espacial e temporal naquele período caracterizou um desastre de alta magnitude. Assim, a UGRHI 04 apresentou núcleos de alta densidade, com destaque para a porção central, onde se observa a formação de uma superfície extensa e contínua de "áreas quentes", ocupando uma porção territorial expressiva da unidade. Esta concentração se estabeleceu sobre os municípios de Cajuru, Santa Cruz da Esperança, Santa Rosa de Viterbo, Serra Azul e São Simão. Os arredores de Ribeirão Preto, Brodowski e Altinópolis também foram severamente atingidos.

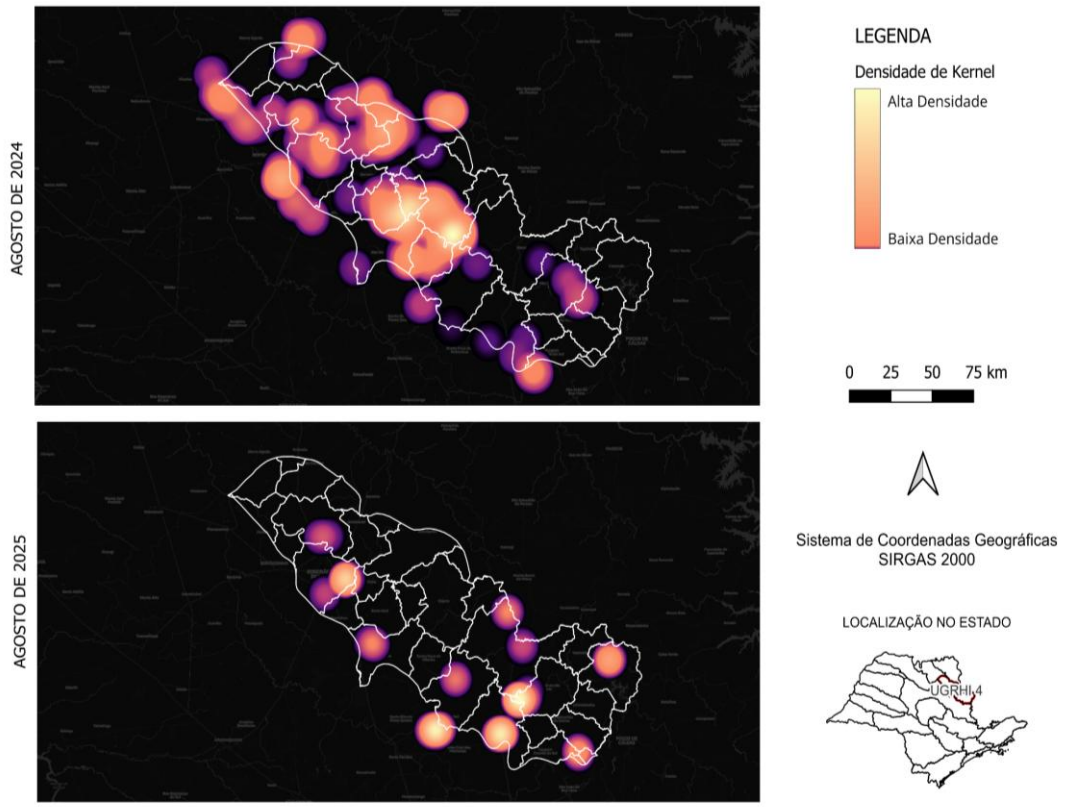


Figura 1: Focos de Queimada na UGRHI 04 em agosto de 2024 e 2025.

Por outro lado, o cenário de 2025 permite constatar um padrão espacial fragmentado e disperso, onde os focos de calor foram acentuados nas porções de borda e ao sul da bacia, sem o estabelecimento de superfícies extensas e contínuas como visto anteriormente. Municípios que antes eram o epicentro, como Ribeirão Preto, passaram a apresentar apenas núcleos isolados e de menor intensidade. Novas ocorrências pontuais foram detectadas em Casa Branca, São José do Rio Pardo e Caconde.

I.2. Bacia Hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu (UGRHI 09)

Para a análise dos focos de calor da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu, tem-se o produto cartográfico (Figura 2) estabelecendo os diferentes cenários de 2024 e 2025. O mês de agosto de 2024 evidência um cenário crítico de focos de calor ao longo da bacia, onde é possível observar um padrão de alta aglomeração espacial que consolida uma superfície de densidade contínua especialmente na porção norte e noroeste do território, sobre os municípios de Pitangueiras, Pontal, Jaboticabal,

Sertãozinho, Guariba, Motuca e arredores. Outros núcleos menores também foram observados em municípios na porção central-leste, como Descalvado, Araras e Itapira. As classes de maior densidade demonstram que a ocorrência do fogo não se deu, necessariamente, por eventos isolados, mas sim por simultâneas frentes de queima. A sobreposição das superfícies de Kernel demonstra certa conectividade existente entre a carga combustível dos diferentes pontos de ignição, ou seja, nessa circunstância, a ocupação do solo no território abriu margens para a propagação e união dos diferentes focos de calor sem qualquer tipo de restrição física e, em termos técnicos, garantiu que as densidades fossem somadas entre si nas células do *raster* de saída, fundindo-as estatística e visualmente.

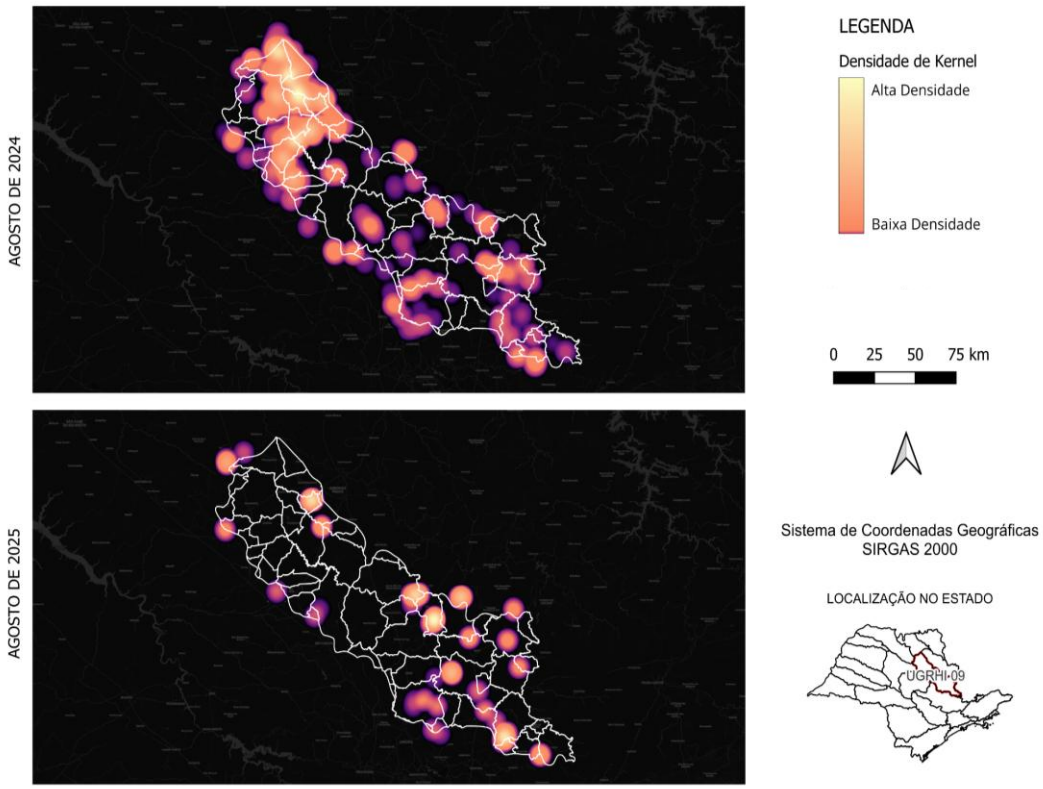


Figura 2: Focos de Queimada na UGRHI 09 em agosto de 2024 e 2025.

Em contrapartida, a maior fragmentação das superfícies de densidade apresentadas em 2025 estabelece zonas de ignição reduzidas e dispersas ao longo de toda a extensão territorial, estabelecendo um cenário em que, apesar da existência de diferentes fontes de calor ativo, estas tendem a se comportar como sendo eventos pontuais e desconexos entre si, revelando que a extensão dos incêndios varia para além dos usos do solo. Enquanto em agosto de 2024 o eixo de maior impacto concentrou-se no oeste e noroeste da bacia, em 2025 o cenário de maior atividade deslocou-se para o leste e sudeste. Nessa ocorrência, os núcleos, embora mais fragmentados, tornaram-se mais frequentes e perceptíveis na porção oriental do território, em cidades como Itapira, São João da Boa Vista e Mogi-Guaçu.

II. Análise da dinâmica de Uso e Ocupação

II.1 Bacia Hidrográfica do Rio Pardo (UGRHI 04)

O mapa apresentado na Figura 3 demonstra a espacialização da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, garantindo a visualização das principais classes de uso e ocupação do território em 2024. O cenário demonstra que a classe agropecuária é predominante, revelando que a questão histórica da expansão agrícola no meio segue sendo, ainda hoje, dominante em toda a extensão territorial da UGRHI 04. Sabendo que o panorama agrícola regional está fortemente associado à monocultura de cana-de-açúcar, tem-se um aspecto que conecta o uso do solo com uma elevada carga combustível no meio, conferindo assim uma maior vulnerabilidade a eventos climáticos extremos e à formação de focos de calor de alta densidade.

Além disso, é notória a proximidade existente entre a classe agropecuária com as manchas urbanas ao longo da bacia, configurando um cenário arriscado em termos socioambientais, econômicos e de saúde pública devido à vulnerabilidade do meio às ocorrências de eventos responsáveis pela liberação de uma carga poluidora expressiva, como no ano de 2024.

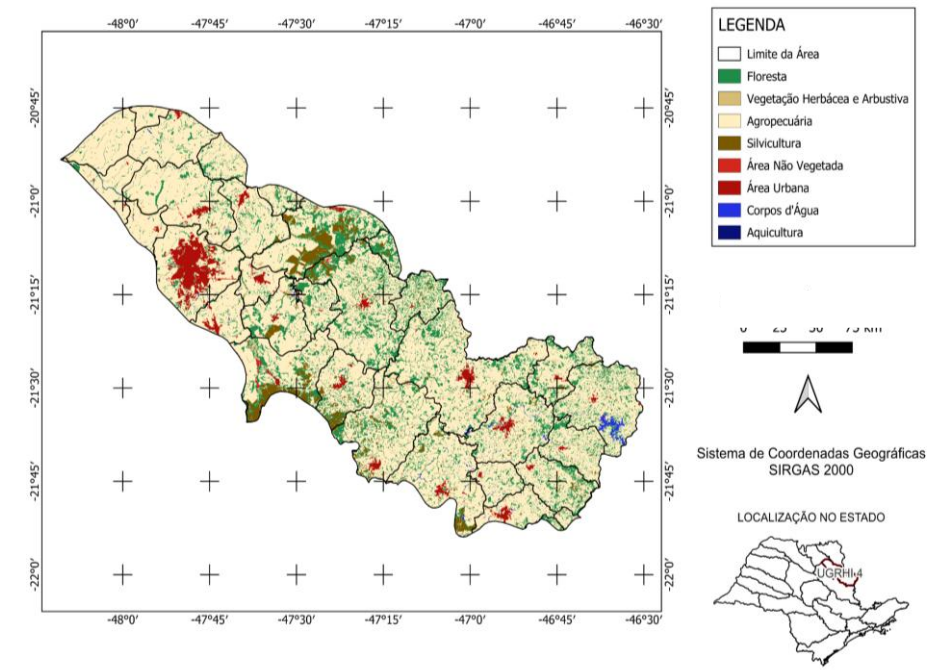


Figura 3: Uso e Ocupação do solo da UGRHI 04 (2024).

Contrapondo a expansão antrópica, a vegetação nativa se mostra altamente fragmentada, com a formação de "ilhas" em diferentes localidades da unidade. Esses remanescentes encontram-se expostos ao "efeito de borda" (METZGER, 1999), fenômeno que, além de facilitar o espalhamento do fogo originado em áreas agropecuárias, está associado à diferentes perdas ecossistêmicas e à diminuição da resiliência biológica do meio.

II.2. Bacia Hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu (UGRHI 09)

O mapa elaborado para a análise da dinâmica de uso e ocupação da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu evidencia que a região é, assim como a UGRHI 04, composta predominantemente por uma matriz agropecuária. A representação da UGRHI 09 demonstra que o entorno do Rio Mogi-Guaçu é dado quase que exclusivamente por uma matriz agropecuária, dinâmica essa que insere os ecossistemas ripários e matas ciliares em um cenário de extrema vulnerabilidade.

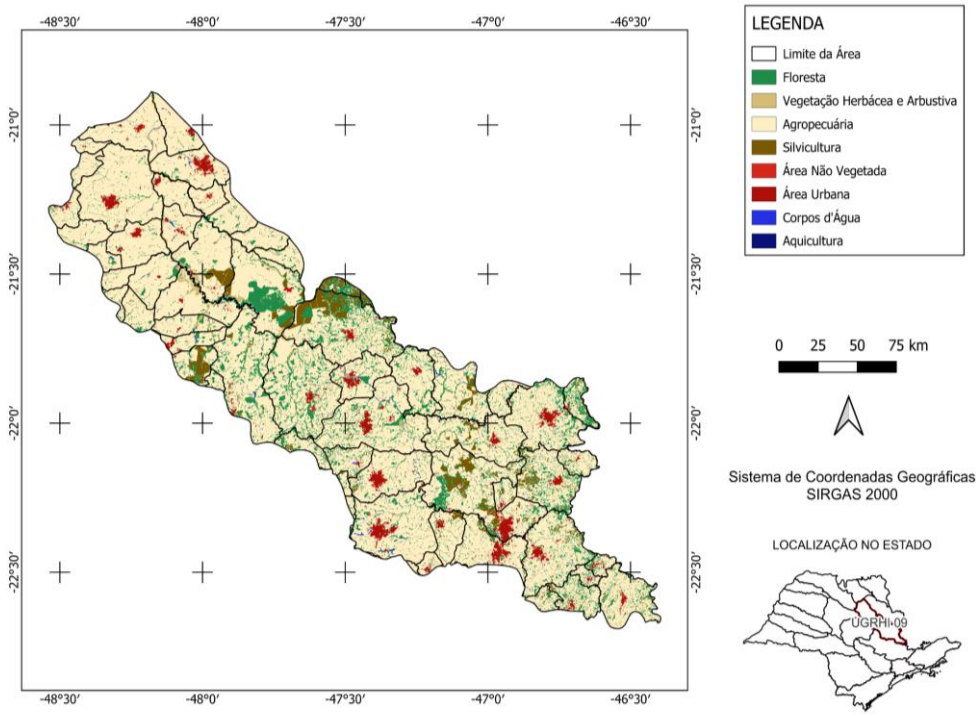


Figura 4: Uso e Ocupação do solo da UGRHI 09 (2024).

A presença de silvicultura na porção central da bacia em conjunto com diferentes fragmentos de vegetação nativa é evidente. No entanto, apesar de se mostrarem expressivos, ainda se encontram imersos em uma matriz que acentua o "efeito de borda" e, consequentemente, diminui a resiliência do meio. Por fim, destaca-se a disposição da rede hidrográfica do território que, embora protegida pela legislação ambiental, demonstra um cenário de evidente redução de áreas verdes em detrimento da contínua expansão agrícola. Tal configuração compromete as diferentes funções ecológicas que essas áreas apresentam, especialmente no que tange à proteção dos recursos hídricos e ao controle de eventos extremos decorrentes das mudanças climáticas.

III. Dinâmica de Uso do Solo e sua Correlação com os Focos de Queimada nas UGRHI 04 e 09

Em ambos os cenários, o mês de agosto de 2024 exibe mapas de calor (*heatmaps*) com manchas de alta densidade que ocupam extensões territoriais expressivas. Na UGRHI 04, a conectividade dos focos de incêndio ao longo da bacia é evidente, enquanto a UGRHI 09 apresenta um padrão de aglomeração mais intenso e localizado. Ao se considerar as superfícies de calor e a dinâmica de uso e ocupação, nota-se que os principais focos de calor estão concentrados na matriz agropecuária, que é historicamente associada à monocultura de cana-de-açúcar em ambas as áreas (CPRM, 2002). Frente aos picos de estiagem extrema, a biomassa seca da monocultura confere uma superfície inflamável para as bacias hidrográficas, permitindo que os focos de incêndio se alastrem por quilômetros sem que sejam interrompidos por quaisquer barreiras naturais. O avanço ininterrupto pelas áreas agrícolas desencadeia problemáticas severas aos fragmentos de vegetação remanescentes que, uma vez atingidos pelo "efeito de borda", acabam perdendo sua umidade natural e, consequentemente, sua função ecológica protetora e reguladora (CALIJURI; CUNHA, 2013).

Apesar de ambas as unidades apresentarem vulnerabilidades semelhantes, a correlação espacial se diferencia consideravelmente visto que a UGRHI 09 apresenta um avanço contínuo do fogo sobre a matriz em um padrão linear-longitudinal, onde a calha principal do Rio Mogi-Guaçu foi tido como um "corredor" facilitador para a dispersão do fogo, enquanto a UGRHI 04 exibe áreas de silvicultura comercial que estabeleceram núcleos térmicos que, apesar de isolados, são de alta densidade. Além disso, é importante ressaltar que a consolidação estrutural antrópica ocorrida na UGRHI 04 constitui um cenário ainda mais grave frente à proximidade dos focos de calor com os centros urbanos, elevando não somente os riscos de ignições acidentais, mas também os impactos socioeconômicos e diversos danos à saúde pública decorrentes da liberação de poluentes.

Em contrapartida, o cenário apresentado para o mês de agosto de 2025 em ambas as bacias hidrográficas demonstra uma queda expressiva na densidade de Kernel, com focos de calor pontuais e dispersos. Isso indica que, embora as fontes de ignição antrópica tenham sido mantidas, a ausência do estresse hídrico impediu a propagação descontrolada dos focos de calor. Tal aspecto demonstra que a dinâmica de uso e ocupação do solo, por si só, não responde à magnitude do desastre visualizado em 2024; no entanto, atua como carga combustível quando associada a condições climáticas extremas.

Comentários finais

A análise espacial da dispersão dos focos de calor nas bacias hidrográficas dos rios Mogi-Guaçu e Pardo juntamente ao mapeamento da cobertura do solo permitiu a compreensão da relação entre eventos climáticos intensos e a vulnerabilidade territorial. O principal ponto encontrado reside na constatação de que o uso do solo está intimamente relacionado com a severidade de eventuais focos de incêndio. No entanto, a relação estabelecida indica que a dinâmica territorial atua como sendo o impulso da propagação descontrolada dos focos de incêndio, enquanto as condições climáticas extremas, como a estiagem de 2024, age enquanto estímulo deflagrador de tais ocorrências. Esta constatação é possível ao considerar a fragmentação dos focos de calor visualizadas em 2025, que na ausência de um estresse hídrico severo, as queimadas ocorreram de forma isolada e sem propagações contínuas de alta densidade ainda que as atividades antrópicas geradoras tenham sido mantidas. Em termos da dinâmica territorial, os resultados demonstram que a classe agropecuária compreendeu quase que totalmente os focos de calor de alta densidade, configurando-a como uma matriz impulsionadora de propagação.

Analisando os resultados para as bacias hidrográficas de forma isolada, observa-se que a UGRHI 04 apresentou a formação de núcleos térmicos de alta intensidade e que, devido à proximidade com centros urbanos, representou riscos socioeconômicos e potenciais problemáticas de saúde pública. Por outro lado, a UGRHI 09 foi atingida por um extenso "corredor térmico", que por sua vez, se mostrou associado à expansão agrícola ao longo do leito principal do rio, impondo ameaças diretas às Áreas de Preservação Permanente (APPs) e ampliando a dispersão de poluentes para a região.

Por fim, o estudo evidencia o impacto crítico dos incêndios sobre a biodiversidade remanescente devido à alta fragmentação e imersão da vegetação nativa em uma matriz agropecuária, que faz com que o meio perca sua atuação enquanto barreira contra chamas e o submete ao "efeito de borda". Assim, uma vez que as frentes de fogo tenham atingido os diferentes fragmentos remanescentes, é possível considerar a indução de processos de degradação acelerada sobre os ecossistemas.

O cenário apresentado fundamenta a necessidade de um planejamento territorial e de estratégias de gestão ambiental adequadas para as UGRHI 04 e 09. Tal necessidade pressupõe a implementação de políticas públicas integradas que extrapolem a supressão de fogo e priorizem: a adoção de práticas de manejo agrícola sustentáveis; o restabelecimento da conectividade dos fragmentos de vegetação nativa; e a definição de estratégias específicas para a adaptação do meio frente às mudanças climáticas, visando mitigar potenciais desastres ambientais em toda a extensão de ambas as unidades.

Agradecimentos

As Autoras gostariam de agradecer a Universidade de São Paulo (Programa Unificado de Bolsas de Estudo para Apoio à Formação de Estudantes de Graduação, PUB-USP, Edital 2025-2026) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ALENCAR, A. et al. **Fogo no Brasil em 2024: o retrato fundiário da área queimada nos biomas.** Nota técnica. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM) e Rede MapBiomas, 2024.

BOJKO, A. **Informative or misleading? Heatmaps Deconstructed**. In: JACKO, J. A. (Ed.). Human-Computer Interaction. New Trends. Lecture Notes in Computer Science, v. 5610. Berlin: Springer, 2009.

BORGES, A. F. et al. **Sistemas geodésicos de referência adotados no Brasil e a conversão dos dados geográficos para o sistema oficial SIRGAS2000: transformações e avaliação de erros.** Geografias, Belo Horizonte, v. 11, n. 2, p. 45-63, 2015.

CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

CARVALHO, E. A.; ARAÚJO, P. C. **Leituras Cartográficas e Interpretações Estatísticas I.** Natal: UFRN/UFPB, 2008.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). **Monitoramento de secas e impactos no Brasil - Agosto 2024.** Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Brasília, 2024.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM); SÃO PAULO (Estado). **Atlas Geoambiental das Bacias Hidrográficas dos Rios Mogi-Guaçu e Pardo - SP: subsídios para o planejamento territorial e gestão ambiental.** São Paulo: CPRM/SMA, 2002.

ECOAGRI. **Diagnóstico da Agricultura no Estado de São Paulo: bases para um Desenvolvimento Rural Sustentável.** Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), 2006.

FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D.; RIBEIRO, G. do N.; SILVA, V. F.; AYRES, G. D. J.; RODRIGUES, R. C. M. **Dinâmica temporal da cobertura e uso das terras do Estado da Paraíba utilizando MapBiomas.** Artigo de Periódico CDSA, 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **TerraBrasilis - Banco de Dados Queimadas**. Programa Queimadas. São José dos Campos: INPE, 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **AR6 Climate change 2023: the physical science basis.** Cambridge: Cambridge University Press, 2023.

MAPBIOMAS. **MapBiomas General Handbook: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Collection 10.1. Versão 1**. Brasil, Fevereiro de 2026.

METZGER, J. P. **Estrutura da paisagem e fragmentação: análise bibliográfica.** Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, v. 71, n. 3, p. 445-463, 1999.

PIVELLO, V. R. et al. **Understanding the causes of fire-induced vegetation shifts in the Brazilian savanna and forest ecosystems**. Conservation Letters, 2021.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System.** Open Source Geospatial Foundation Project, 2022.

SAMPAIO, T. V. M. **Cartografia Temática.** Curitiba: UFPR, 2019.

SANT'ANA, R. M. S.; CARVALHO, S. S.; JESUS, A. B. **Espacialização das ocorrências da companhia de polícia de proteção ambiental – COPPA, através do uso de geotecnologias.** Revista Eletrônica: tempo, técnica e território, v. 5, p. 62-71, 2014.

SÃO PAULO (Estado). **Lei Estadual n° 16.337, de 14 de dezembro de 2016**. Estabelece a divisão hidrográfica do Estado de São Paulo. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, 2016.

SOUZA NETO, L. T.; SILVA, M. T.; VALE, W. K. S.; GRIGIO, A. M. **O uso do mapa de Kernel como subsídio para identificação da dispersão dos focos de queimadas no município de Mossoró (RN)**. Revista de Geografia (Recife), v. 38, n. 2, p. 244-265, 2021.

TOMZHINSKI, G. W.; COURA, P. H. F.; FERNANDES, M. C. **Avaliação da Detecção de Focos de Calor por Sensoriamento Remoto para o Parque Nacional do Itatiaia.** Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, v. 34, n. 2, 2011.

WHITE, B. L. A.; WHITE, L. A. S. **Queimadas e incêndios florestais no estado de Sergipe, Brasil, entre 1999 e 2015.** Floresta, Curitiba, v. 46, p. 561-570, 2016.

USO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA MODELAGEM ESPACIAL EM UNIDADES DE CONSERVAÇÃO: O CASO DO PARQUE ESTADUAL DO JURUPARÁ

1 Gabriela dos Santos Luchetti Vieira, 2 Micleia Nascimento Vieira, 3 Julia De Carvalho Brito, 4 Valquíria Miwa Hanai Yoshida, 5 Roberto Wagner Lourenço

1 Universidade Estadual Paulista (Unesp), e-mail: gabriela.luchetti@unesp.br; 2 Universidade Estadual Paulista (Unesp), e-mail: micleia.vieira@unesp.br; 3 Universidade Estadual Paulista (Unesp), e-mail: julia.c.brito@unesp.br; 4 Universidade de Sorocaba (Uniso), e-mail: valquiria.yoshida@prof.uniso.br; 5 Universidade Estadual Paulista (Unesp), e-mail: roberto.lourenco@unesp.br

Palavras-chave: Random Forest; uso e cobertura do solo; geoprocessamento

Resumo

As mudanças climáticas globais, associadas às pressões antrópicas sobre o uso e a cobertura da terra, têm intensificado os processos de degradação ambiental, com impactos diretos sobre a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos. Nesse contexto, as Unidades de Conservação (UCs) de Proteção Integral desempenham papel estratégico na conservação, embora permaneçam sujeitas a conflitos de uso decorrentes de atividades incompatíveis com seus objetivos legais. Este estudo teve como objetivo mapear e priorizar espacialmente os conflitos de uso da terra no Parque Estadual Jurupará (SP), inserido no bioma Mata Atlântica. Para isso, foram utilizados dados de uso e cobertura da terra do MapBiomas (Coleção 10) e sete variáveis explicativas derivadas de bases oficiais, o processamento foi realizado em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Os conflitos foram identificados a partir da sobreposição entre usos antrópicos e áreas legalmente protegidas (UC e Áreas de Preservação Permanente – APPs), sendo classificados em dois níveis de criticidade. O modelo Random Forest (RF) foi aplicado na plataforma Google Earth Engine para estimar a probabilidade espacial de ocorrência de conflitos, apresentando desempenho satisfatório (acurácia global de 84,4% e índice Kappa de 0,686). A partir desses resultados, foi desenvolvido o Índice de Severidade de Conflito (ISC), baseado em combinação linear ponderada por meio da Análise Hierárquica de Processos (AHP), integrando a probabilidade de conflito, a criticidade legal e a proximidade ao limite da UC (exposição ao efeito de borda). Os resultados indicaram que 93,75% da área do parque encontra-se em condição adequada, enquanto 6,25% apresentam usos incompatíveis, com predominância de mosaicos de uso e pastagem. As áreas mais críticas concentram-se em zonas de borda e em APPs associadas à rede hidrográfica. O ISC permitiu identificar espacialmente áreas prioritárias para intervenção, superando abordagens binárias e subsidiando ações de restauração e fiscalização. A metodologia mostrou-se reprodutível e aplicável a outras UCs, contribuindo para o avanço de abordagens quantitativas no suporte à gestão de áreas protegidas.

Introdução

As mudanças climáticas globais, em conjunto com as pressões antrópicas decorrentes das dinâmicas de uso e cobertura da terra, têm provocado transformações expressivas na vegetação nativa, na biodiversidade e na oferta de serviços ecossistêmicos. Tais alterações acarretam impactos diretos na segurança alimentar, na saúde pública, na resiliência dos sistemas urbanos e na conservação dos ecossistemas naturais (Song et al., 2018; Pecl et al., 2017). O Brasil detém uma das maiores extensões de florestas tropicais do mundo e abriga uma das mais diversas biodiversidades do planeta, condição que impõe responsabilidades globais de conservação (Patel et al., 2020).

Dessa forma, torna-se indispensável a adoção de medidas voltadas à proteção e preservação de áreas ambientalmente sensíveis, bem como à mitigação dos impactos das mudanças climáticas. Nesse sentido, o estabelecimento e a manutenção de áreas protegidas configuram-se como estratégias essenciais para a conservação da biodiversidade, sendo responsabilidades compartilhadas entre os setores público e privado (Arruda et al., 2024).

As Unidades de Conservação (UCs) desempenham papel fundamental na conservação da biodiversidade, contribuindo para a proteção dos ecossistemas naturais, da fauna e da flora, além de assegurarem a manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais, como a regulação climática, a conservação do solo e a proteção dos recursos hídricos (Rodrigues e Gandolfi, 2020).

No Brasil, a gestão dessas áreas é estruturada pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), instituído pela Lei nº 9.985/2000, que estabelece diretrizes, categorias e instrumentos para a criação, implantação e gestão das áreas protegidas em âmbito federal, estadual e municipal. O SNUC organiza as Unidades de Conservação em dois grandes grupos: Unidades de Proteção Integral, nas quais é permitido apenas o uso indireto dos recursos naturais, com restrições à exploração direta; e Unidades de Uso Sustentável, que admitem o uso dos recursos naturais de forma compatível com a conservação ambiental.

No bioma Mata Atlântica, historicamente submetido a intensos processos de ocupação e conversão do uso da terra, restam atualmente menos de 12% de sua cobertura vegetal original, sendo reconhecido como um hotspot global de biodiversidade (SOS Mata Atlântica, 2023). Nesse contexto, as Unidades de Conservação de Proteção Integral assumem relevância estratégica por constituírem remanescentes contínuos de vegetação nativa. Entretanto, essas áreas encontram-se sob crescentes pressões antrópicas, decorrentes, sobretudo, da expansão agropecuária e da urbanização, o que compromete sua integridade ecológica e a efetividade de seus objetivos de conservação (Lima et al., 2025).

Além do instrumento legal que protege todo o território da UC também pode haver a ocorrência de APPs protegidas também pelo Código Florestal (Lei 12.651/2012). As áreas protegidas desempenham um papel crucial em todo o território nacional, contribuindo para a contenção da expansão urbana, a preservação dos remanescentes florestais e a proteção dos biomas. Sua presença é estratégica para a manutenção da integridade ecológica regional, especialmente diante da intensa pressão antrópica sobre os ecossistemas nativos (Junior et al., 2020).

A ocorrência de usos antrópicos incompatíveis com os objetivos de conservação configura situações de conflito de uso da terra, caracterizadas pela sobreposição entre a destinação legal da área e práticas como urbanização e atividades agropecuárias indevidas. Esses conflitos refletem o descumprimento das restrições estabelecidas, comprometendo a integridade ecológica e a funcionalidade dos ecossistemas. Estudos recentes demonstram que, mesmo em UCs formalmente instituídas, observa-se a perda de cobertura vegetal nativa em seu interior, com intensificação dos conflitos especialmente em zonas de borda e em fragmentos sob forte pressão regional (Guidotti et al., 2021; Clerici et al., 2019). No estado de São Paulo, o Parque Estadual Jurupará (PE Jurupará) insere-se em uma região de transição entre áreas rurais e um polo urbano em expansão, o que o torna particularmente suscetível a pressões decorrentes de usos indevidos do território.

A identificação e a priorização dessas áreas conflitantes em UC requerem abordagens espacialmente explícitas que não se limitem às análises simplificadas baseadas apenas na classificação binária de adequação ou inadequação do uso da terra. Nesse sentido, torna-se necessário incorporar métodos capazes de representar gradientes de intensidade de pressão antrópica e diferentes níveis de criticidade associados aos conflitos. O algoritmo Random Forest (RF), amplamente aplicado em problemas de classificação e modelagem ambiental (Breiman, 2001; Maxwell et al., 2018), permite estimar a probabilidade espacial de ocorrência de conflitos a partir de variáveis preditoras contínuas, gerando superfícies de risco mais realistas e informativas.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo mapear e priorizar espacialmente os conflitos de uso da terra no PE Jurupará, UC de proteção integral inserida no bioma Mata Atlântica, classificando-os em dois níveis de criticidade legal e construindo o Índice de Severidade de Conflito (ISC) a partir de modelagem probabilística com RF e pesos definidos por AHP, como subsídio a ações de restauração e fiscalização ambiental na unidade.

Metodologia

Área de estudo

O PE Jurupará (Figura 1) possui uma área aproximada de 262,35 km² (26.235 ha), está localizado ao sul do estado de São Paulo. É classificado como UC de proteção integral, conforme estabelecido pelo SNUC. A unidade abrange porções territoriais inseridas em uma região sob influência de expansão urbana, o que reforça sua relevância no contexto da conservação regional.

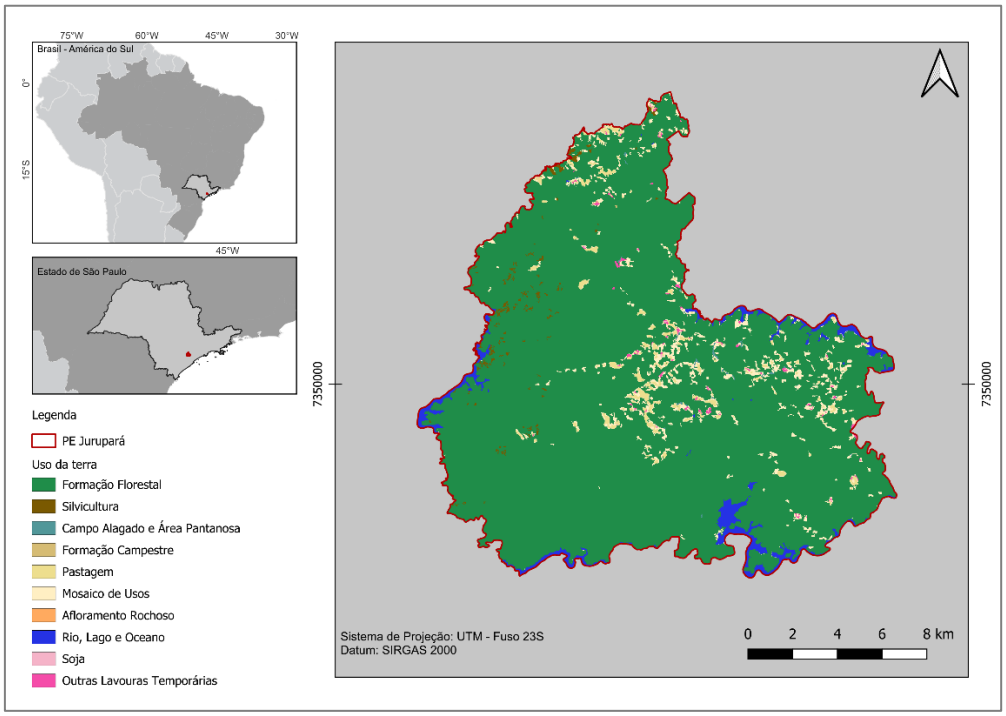


Figura 01: Mapa de localização do PE Jurupará e seu uso da terra
Fonte: Elaborado pelos autores com base no Mapbiomas

Inserido em uma área originalmente destinada a atividades extrativistas, o PE Jurupará desempenha papel ecológico fundamental ao atuar como corredor ecológico, promovendo a conectividade entre remanescentes florestais e contribuindo para a manutenção da biodiversidade. Além disso, exerce função estratégica na proteção da bacia hidrográfica do Alto Juquiá,

garantindo a conservação de recursos hídricos essenciais, bem como no fomento a atividades de pesquisa científica e educação ambiental (Junior et al., 2020; Ribeiro et al., 2018).

Do ponto de vista climático, segundo a classificação de Köppen-Geiger, a região apresenta clima do tipo Cwb, caracterizado como temperado de altitude, com verões chuvosos e invernos secos, o que influencia diretamente os processos ecológicos e a dinâmica da vegetação. A cobertura vegetal predominante é composta por Floresta Ombrófila Densa, inserida em uma zona de transição entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado, conferindo elevada heterogeneidade ambiental e elevada riqueza biológica à área de estudo (Oliveira et al., 2016; Salles et al., 2008).

Levantamento de dados e processamento das variáveis

Os dados espaciais foram obtidos em diferentes formatos (.shp e .tif) a partir de diferentes bases de dados oficiais e institucionais, incluindo IBGE, ICMBio, USGS e INPE, bem como por meio de processamento em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). O mapeamento de uso e cobertura da terra foi obtido por meio da plataforma MapBiomas (Coleção 10) para o ano de 2024. Na área de estudo, foram identificadas as seguintes classes: Formação Florestal, Silvicultura, Campo Alagado, Formação Campestre, Pastagem, Mosaico de Usos, Corpos d'água, Soja e Outras Lavouras Temporárias.

No total, foram utilizadas sete variáveis explicativas, previamente processadas no software ArcGIS Pro (ESRI, 2024) e, posteriormente, armazenadas como assets na plataforma Google Earth Engine (GEE) para a execução das etapas subsequentes da análise. As variáveis consideradas foram: distância euclidiana à estradas; à aglomerados urbanos; e à rede hidrográfica; declividade (slope); Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE), representativo do potencial de erosão do solo; uso da terra; e o *Normalized Difference Moisture Index* (NDMI) (), indicador da umidade da vegetação, associado a condições de degradação ambiental, calculado como uma razão entre os valores NIR e SWIR, conforme Equação 1.

$$\frac{(NIR-SWIR)}{(NIR-SWIR)} \quad (1)$$

Classificação do conflito do uso da terra

O conflito foi identificado por sobreposição entre o mapa de uso da terra e as camadas de restrição (UC de Proteção Integral e APPs). Para a delimitação das APP, utilizou-se a ferramenta buffer, adotando os critérios estabelecidos pelo Código Florestal (Lei nº 12.651/2012). Para fins desta análise, foram classificadas como inadequadas todas as classes de uso antrópico (Silvicultura, Campo Alagado e Área Pantanosa, Formação Campestre, Pastagem, Mosaico de Usos, Soja e Outras Lavouras Temporárias) e como adequadas Formação Florestal.

Com base nessa definição, os conflitos foram categorizados em dois níveis de criticidade. O Nível 1 corresponde à ocorrência de usos antrópicos no interior do limite PE Jurupará, em desacordo com as diretrizes SNUC, onde qualquer uso antrópico é incompatível com proteção integral. O Nível 2 refere-se à ocorrência de usos antrópicos em APP internas ao PE, configurando uma situação de dupla restrição legal, em conformidade tanto com o SNUC quanto com o Código Florestal. Dessa forma, os conflitos de Nível 2 são considerados de maior gravidade em relação aos de Nível 1.

O produto resultante dessa análise consistiu em um mapa temático de ocorrência de conflito, de natureza dicotômica, no qual os pixels foram classificados como presença (1) ou ausência (0) de conflito. Esse mapeamento foi utilizado como variável-resposta no modelo de RF.

Índice de Severidade de Conflito (ISC)

O ISC foi desenvolvido a partir de uma combinação linear ponderada de três variáveis, cujos pesos foram definidos com base na AHP (Saaty, 1980), a qual obteve uma RC = 0,031. As variáveis consideradas foram: (i) a probabilidade de ocorrência de conflito estimada pelo modelo RF (60,5%); (ii) o nível de criticidade do conflito, convertido em escala numérica, sendo Nível 1 = 0,5 e Nível 2 = 1,0 (29,2%); e (iii) a distância ao limite do PE Jurupará, invertida e normalizada (10,3%).

Todas as variáveis foram normalizadas para o intervalo de 0 a 1, assegurando a comparabilidade entre os diferentes critérios. A consistência da matriz de importância por comparação pareada da AHP foi verificada por meio da Razão de Consistência (RC). Valores inferiores ao limite de 0,10, indicam consistência adequada na atribuição dos pesos.

O ISC resultante foi classificado em cinco classes de severidade, com intervalos iguais de 0,20, variando de Muito Baixa a Muito Alta, permitindo a identificação de áreas prioritárias para subsidiar ações de gestão, monitoramento e tomada de decisão no âmbito da UC.

Modelagem de probabilidade de conflito com Random Forest

O modelo RF foi implementado na plataforma GEE por meio do classificador "*smileRandomForest",* utilizando 500 árvores e *seed* igual a 42, garantindo a reprodutibilidade dos resultados. A amostragem foi realizada de forma estratificada e balanceada, com a seleção de 500 pontos por classe, totalizando 1.000 amostras, as quais foram divididas aleatoriamente em 70% para treinamento (n = 706) e 30% para validação (n = 294). O intuito do modelo é estimar a probabilidade espacial contínua de ocorrência de conflitos de uso da terra, substituindo a classificação binária e servindo como uma extensão do ISC.

A avaliação do desempenho do modelo foi conduzida por meio da matriz de confusão, com o cálculo da acurácia global e do coeficiente Kappa como métricas de validação. O modelo foi aplicado em modo probabilístico (PROBABILITY) sobre toda a extensão do PE Jurupará, resultando em um raster contínuo de probabilidade de ocorrência de conflito, com valores variando entre 0 e 1.

Destaca-se que o algoritmo RF apresenta robustez frente à presença de correlação entre variáveis preditoras (Breiman, 2001), não sendo necessária a aplicação prévia de técnicas de redução de colinearidade. O script foi desenvolvido em linguagem JavaScript, com base na documentação oficial do GEE.

Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta o mapa de conflito de uso da terra no interior do PE Jurupará, evidenciando que 93,75% da área encontra-se em condição adequada de acordo com a legislação, composta por formação florestal e corpos hídricos. Em contrapartida, 6,25% da área total apresenta uso inadequado, configurando situações de conflito. Desse total, 4,81% (12,61 km²) correspondem a conflitos de Nível 1, caracterizados pelo conflito nas áreas do parque fora de APP. Já os conflitos de Nível 2 representam 1,44%% (3,77 km²) da área total, correspondendo a usos antrópicos incidentes sobre APPs no interior da unidade, configurando maior gravidade em função da dupla restrição legal.

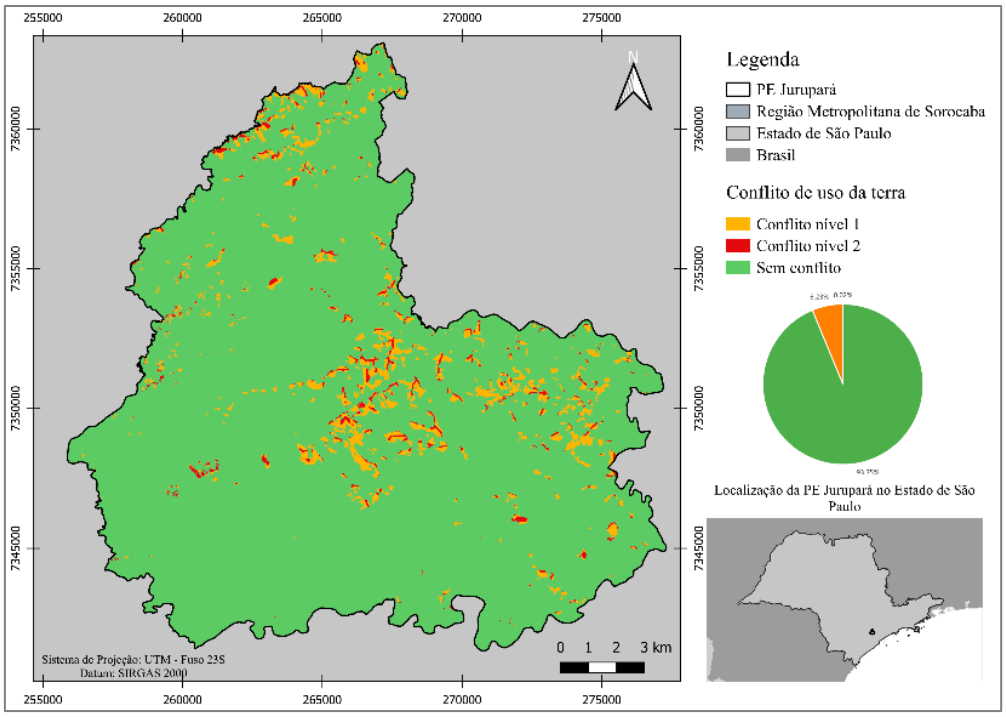


Figura 02: Mapa de conflito de uso da terra do PE Jurupará.
Fonte: Elaborado pelos autores

Os conflitos de Nível 1 e 2 apresentam associação espacial, ou seja, ocorrem de forma concomitante. A distribuição possui maior concentração nas porções central e norte do parque, enquanto a porção sul permanece predominantemente preservada. A elevada ocorrência de conflitos no setor centro-oeste da unidade está relacionada à proximidade com a malha viária, aglomerados urbanos e áreas rurais do entorno, que favorecem a intensificação de usos antrópicos. Esse padrão é consistente com estudos que indicam maior incidência de conflitos em áreas sob forte pressão regional e inseridas em matrizes agropastoris (Guidotti et al., 2021). A localização do PE Jurupará em uma região metropolitana caracterizada por expansão urbana e consolidação agropecuária, reforça essa dinâmica e evidencia a necessidade de monitoramento contínuo das áreas limítrofes (Junior et al., 2020; Oliveira et al., 2016).

As áreas de APPs internas ao PE Jurupará ocupam 65,09 km², onde 3,78 km² (378 ha; 5,80%) apresentam uso antrópico incompatível, configurando conflito com dupla proteção legal violada. Por categoria de APP, os conflitos concentram-se em APP de rios (2,10 km²; 55,6% do total em conflito), seguidas de encosta e topos de morro (1,27 km²; 33,6%), APP de nascentes (0,34 km²; 9,0%) e massas d'água (0,07 km²; 1,9%). Por classe de uso, Mosaico de Usos domina (2,22 km²; 58,7%), seguido de Pastagem (0,74 km²; 19,5%), Silvicultura (0,41 km²; 10,9%) e Outras Lavouras Temporárias (0,26 km²; 6,9%). A concentração de conflito em APP hídricas é preocupante sob a perspectiva ecossistêmica, dado o papel dessas faixas na regulação hídrica, filtragem de sedimentos e manutenção da conectividade entre fragmentos florestais (Brancalion et al., 2016; Strassburg et al., 2020). A Tabela 1 apresenta a síntese dos valores associados às APPs.

Entre as classes conflitantes, Mosaico de Usos concentra a maior área (9,87 km²; 60,2% do conflito), seguida por Pastagem (3,92 km²; 23,9%), Silvicultura (1,41 km²; 8,6%), Outras Lavouras Temporárias (0,81 km²; 5,0%) e Campo Alagado e Área Pantanosa (0,33 km²; 2,0%), com participações menores de Soja (0,04 km²) e Formação Campestre (0,02 km²). O predomínio de Mosaico de Usos e Pastagem é padrão recorrente em UC inseridas em matrizes agropastoris do bioma Mata Atlântica (Guidotti et al., 2021), sinalizando pressão histórica de uso agropecuário.

Uso da terra	Conflito - Nível 1		Conflito Nível 2	
Classe	**km²**	**%**	**km²**	**%**
Silvicultura	1,40990	0,54	0,412571	0,16
Campo Alagado e Área Pantanosa	0,33432	0,13	0,134966	0,05
Formação Campestre	0,01880	0,01	0,000602	0,00
Pastagem	3,91528	1,49	0,737136	0,28
Mosaico de Usos	9,86935	3,76	2,217986	0,85
Soja	0,03678	0,01	0,012795	0,00
Outras Lavouras Temporárias	0,81332	0,31	0,262308	0,10

Tabela 01: Conflito de Nível 1 e 2 por classe de uso da terra no PE Jurupará.
Fonte: Elaborado pelos autores

A predominância de classes associadas a usos antrópicos, especialmente Mosaico de Usos e Pastagem, evidencia um padrão espacial de pressão consolidada no interior da unidade, o que reforça a necessidade de abordagens quantitativas capazes de captar a complexidade e a intensidade desses conflitos. Nesse contexto, a modelagem por aprendizado de máquina, em especial o RF, permite não apenas identificar a ocorrência dos conflitos, mas também estimar sua probabilidade espacial de forma contínua, oferecendo maior robustez analítica para a compreensão e quantificação desses padrões.

O ISC (Figura 3) apresentou comportamento não homogêneo, tendo as áreas de maior severidade concentram-se principalmente na porção central e em setores específicos próximos ao limite da unidade de conservação, evidenciando regiões mais suscetíveis à ocorrência e intensificação de conflitos. Esses núcleos críticos indicam zonas prioritárias para ações de monitoramento e gestão, uma vez que representam pontos de maior pressão antrópica ou vulnerabilidade ambiental. A distribuição espacial observada reforça a heterogeneidade do fenômeno na área de estudo, permitindo a identificação de áreas-chave para subsidiar estratégias de planejamento e tomada de decisão no contexto da conservação.

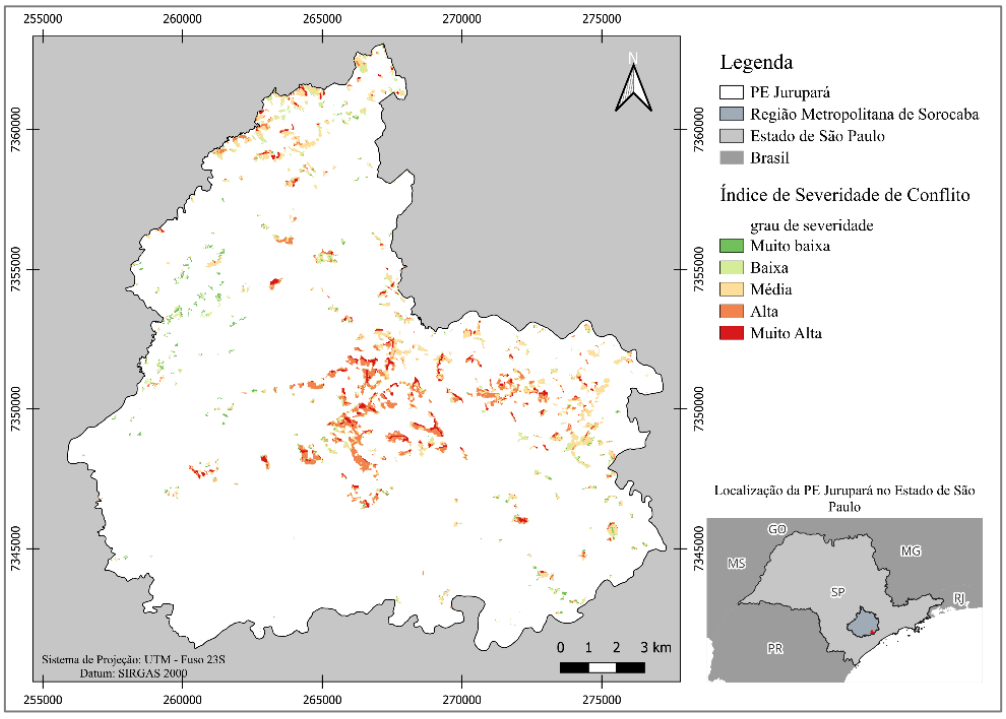


Figura 03: Mapa do ISC classificado em cinco classes de severidade no PE Jurupará.
Fonte: Elaborado pelos autores

O modelo RF obteve acurácia geral de 84,4% e Kappa de 0,686, indicando concordância muito boa de acordo com Landis e Koch (1977). A matriz de confusão entre a classificação do modelo e os dados observados é apresentada na Tabela 02. A sensibilidade para a classe conflito foi de 82,1% e a especificidade de 87,1%, demonstrando equilíbrio entre os erros de omissão e comissão. O desempenho é consistente com resultados reportados para aplicações similares de RF em classificação ambiental com dados de sensoriamento remoto (Maxwell et al., 2018; Talukdar et al., 2020).

	Predito: Sem conflito	Predito: Conflito	Total observado
Observado: Sem conflito	115	17	132
Observado: Conflito	29	133	162
Total predito	144	150	294

Tabela 02: Matriz de confusão do modelo RF do conjunto de validação (n = 294)
Fonte: Elaborado pelos autores com base no GEE

O mapa gerado pelo modelo (Figura 4) resulta da integração da probabilidade de ocorrência de conflito estimada pelo modelo RF, da criticidade legal associada ao uso inadequado e da proximidade ao limite do parque, representativa da exposição ao efeito de borda. As classes "Alta" e "Muito Alta" identificam as áreas mais críticas, prioritárias para intervenções imediatas, enquanto a classe "Média" indica zonas que demandam monitoramento contínuo.

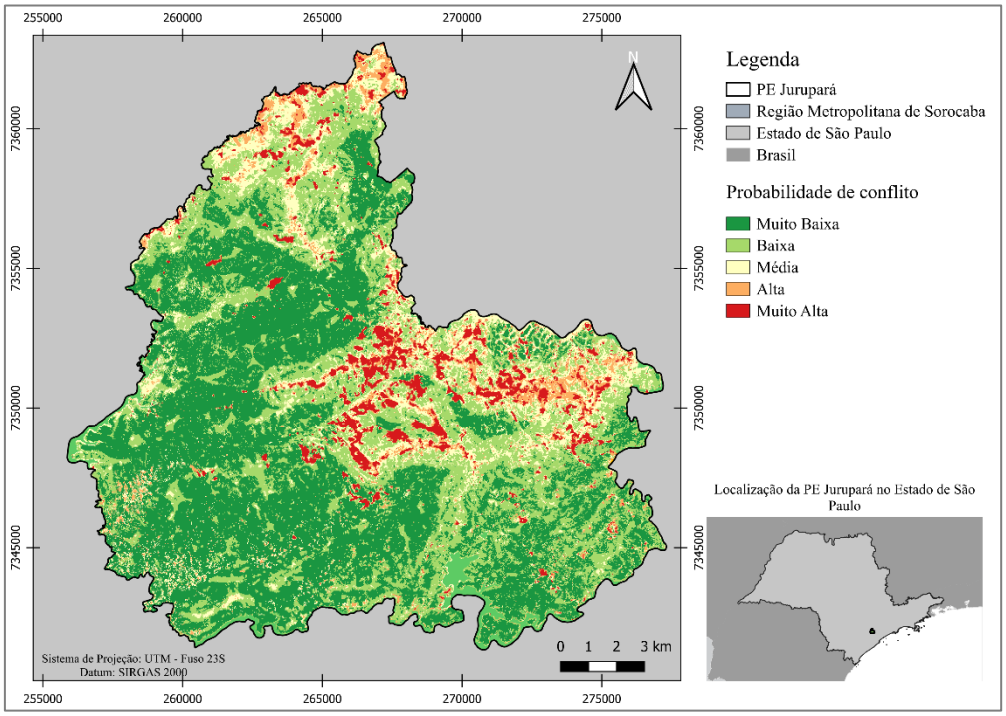


Figura 03: Mapa contínuo de conflito no PE Jurupará gerado pelo modelo RF.
Fonte: Elaborado pelos autores

A distribuição espacial evidencia um padrão não homogêneo dentro do PE Jurupirá, indicando concordância com mapa de ISC. É possível observar uma clara concentração das classes "Alta" e "Muito Alta" na porção centro-leste da unidade. Esse agrupamento sugere a existência de áreas onde se sobrepõem múltiplos fatores de pressão, como maior probabilidade de ocorrência de conflitos, presença de usos antrópicos em desacordo com a legislação e maior exposição ao efeito de borda. A proximidade com limites do parque e possivelmente com áreas já antropizadas no entorno contribui para intensificar esses conflitos. A relação entre a proximidade ao limite da UC e a intensidade dos conflitos é documentada na literatura e associada à permeabilidade da borda frente às pressões da matriz agropastoril circundante, especialmente em UCs inseridas em regiões metropolitanas em expansão (Nolte et al., 2013; Junior et al., 2020).

Por outro lado, as classes de menor severidade ("Muito baixa" e "Baixa") aparecem de forma mais dispersa, especialmente em porções marginais e menos pressionadas, o que pode refletir áreas com menor interferência antrópica ou maior integridade ambiental, ou seja, em áreas com alta densidade de cobertura florestal, o que reflete menor interferência antrópica e maior integridade ecológica (Oliveira et al., 2016). A classe "Média", distribuída de maneira intermediária, atua como uma zona de transição, indicando regiões que, embora ainda não críticas, apresentam potencial de agravamento caso não sejam monitoradas. Isso reforça a necessidade de priorização de ações de gestão nas áreas centrais mais críticas, ao mesmo tempo em que destaca a importância de estratégias preventivas nas zonas de severidade média para evitar a expansão dos conflitos.

O mapa contínuo de probabilidade de conflito (Figura 4) gerado pelo modelo RF apresenta uma abordagem probabilística, representando de forma gradual a propensão à ocorrência de conflitos ao longo da área de estudo. Essa representação contínua permite identificar tendências espaciais e zonas com maior ou menor probabilidade de ocorrência, fornecendo uma visão preditiva do fenômeno. Por outro lado, o ISC (Figura 3) expressa de forma categorizada onde os conflitos efetivamente se manifestam e qual o seu grau de severidade, permitindo uma interpretação mais direta para fins de gestão.

Dessa forma, os dois produtos são complementares: enquanto o mapa obtido pelo RF contribui ao evidenciar a probabilidade de ocorrência dos conflitos em uma perspectiva contínua, o mapa do ISC sintetiza essas informações com outros

fatores, delimitando espacialmente as áreas e classificando os níveis de severidade. Assim, o RF amplia a compreensão do padrão espacial dos conflitos, ao passo que o ISC orienta a priorização de áreas críticas para tomada de decisão.

O produto gerado constitui uma ferramenta diretamente aplicável ao planejamento e à tomada de decisão na gestão da Unidade de Conservação, subsidiando a definição de áreas prioritárias para restauração ecológica e a elaboração de estratégias de fiscalização, com alocação espacialmente otimizada dos esforços operacionais (Nolte et al., 2013).

Conclusões

Apesar de o PE Jurupará apresentar a maior parte de sua extensão composta por formação florestal e corpos hídricos, foram identificados focos de conflito de uso da terra, evidenciando usos incompatíveis com os objetivos de proteção integral e em desacordo com os instrumentos legais vigentes. Considerando a relevância da unidade para a conservação da biodiversidade e a provisão de serviços ecossistêmicos, estudos dessa natureza contribuem de forma significativa para o monitoramento ambiental, auxiliando na contenção do avanço de atividades antrópicas e no direcionamento de ações de restauração ecológica e regeneração natural.

O modelo RF demonstrou-se adequado para estimar a probabilidade espacial de ocorrência de conflitos em UC, apresentando desempenho satisfatório e capacidade de representar gradientes de pressão antrópica a partir de variáveis derivadas de sensoriamento remoto e métricas de proximidade na paisagem. Nesse contexto, ferramentas de aprendizado de máquina associadas ao sensoriamento remoto configuram-se como importantes aliadas na conservação florestal.

O ISC proposto constitui um instrumento operacional de priorização espacialmente explícita, superando abordagens baseadas em classificações binárias e subsidiando a tomada de decisão voltada à restauração ecológica e à fiscalização ambiental.

A metodologia apresentada é reprodutível e aplicável a outras UCs, contribuindo para o avanço de abordagens quantitativas no suporte à gestão de áreas protegidas, especialmente no bioma Mata Atlântica.

Como perspectiva futura, recomenda-se o aprimoramento da etapa de ponderação dos critérios, visando representar de forma mais contínua as incertezas associadas à tomada de decisão multicritérios.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento: Processo CNPq 440869/2022-6. Os autores agradecem ao Laboratório de Geoprocessamento e Modelagem Matemática Ambiental e ao Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de Sorocaba pelo apoio técnico e cientifico.

Referências Bibliográficas

ARRUDA, Daniel M. et al. Vegetações amazônicas e terras indígenas ameaçadas pelas próximas mudanças climáticas: previsão de impacto nos biomas brasileiros. *Austral Ecology*, v. 49, n. 1, 2024.

BRANCALION, Pedro Henrique Santin et al. Análise crítica da Lei de Restauração Florestal Brasileira (2012): atuais óbices e perspectivas para a implementação prática de projetos. *Natureza & Conservação*, v. 14, p. 1–10, 2016.

BRASIL. Lei n.º 9.985, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC). Brasília: Congresso Nacional, 2000.

BRASIL. Lei n.º 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Brasília: Congresso Nacional, 2012.

BREIMAN, Leo. Random forests. *Machine Learning*, v. 45, n. 1, p. 5–32, 2001.

CHAZDON, Robin L. et al. A policy-driven knowledge agenda for global forest and landscape restoration. *Conservation Letters*, v. 10, n. 1, p. 125–132, 2017.

CLERICI, Nicola et al. Deforestation in Colombian protected areas increased during post-conflict periods. *PeerJ*, v. 7, e7739, 2019.

ELITH, Jane et al. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, v. 29, n. 2, p. 129–151, 2006.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. Relatório anual 2023: atividades e balanço institucional. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica, 2023. Disponível em: https://sosma.org.br/relatorio-anual-2023. Acesso em: 3 maio 2026.

GUIDOTTI, Vinicius et al. Changes in Brazil's forest code can erode the potential of riparian buffers to supply watershed services. *Land Use Policy*, v. 94, art. 104511, p. 1–11, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104511.

GUIDOTTI, Vinicius et al. Rare and hungry: Brazil's protected areas are threatened by deforestation and low food production. *Land Use Policy*, v. 111, 105711, 2021.

JUNIOR, Vidal Dias da Mota et al. Proteção da biodiversidade, legislação e políticas públicas na região metropolitana de Sorocaba–SP, Brasil, entre 2010 e 2019. *Trayectorias Humanas Trascontinentales*, n. 7, 2020.

LIMA, Ricardo Cordeiro de et al. Influência das perturbações antrópicas em unidades de conservação urbanas de Mata Atlântica. *Caminhos de Geografia*, v. 26, n. 103, 2025. DOI: 10.14393/rcg2610374552.

MAPBIOMAS. Coleção de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil. Disponível em: https://mapbiomas.org. Acesso em: 2025.

MAXWELL, Aaron E.; WARNER, Timothy A.; FANG, Fang. Implementation of machine-learning classification in remote sensing: an applied review. *International Journal of Remote Sensing*, v. 39, n. 9, p. 2784–2817, 2018.

NOLTE, Christoph et al. Governance regime and location influence avoided deforestation success of protected areas in the Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 110, n. 13, p. 4956–4961, 2013.

OLIVEIRA, Renan Angrizani de et al. Proposição de corredor ecológico entre duas unidades de conservação na Região Metropolitana de Sorocaba. *Revista do Departamento de Geografia da USP*, v. 32, p. 61, 2016.

PATEL, Dhiren et al. Carbon credits on blockchain. In: *IEEE International Conference on Blockchain*, 2020. Proceedings... IEEE, 2020.

PECL, Gretta T. et al. Biodiversity redistribution under climate change: impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, v. 355, n. 6332, p. eaai9214, 2017.

RIBEIRO, Francisco Carlos et al. Indicadores comparados da produção agrícola da Região Metropolitana de Sorocaba: emprego, renda e capital humano. In: *Economia Brasileira em Debate: Subsídios ao Desenvolvimento*. São Paulo: Editora Blucher, 2018. p. 33–46.

RODRIGUES, Ricardo Ribeiro; GANDOLFI, Sergius; NAVE, André Gustavo et al. Large-scale ecological restoration of high-diversity tropical forests in SE Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 261, n. 10, p. 1605–1613, 2011. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.07.005.

SAATY, Thomas L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. New York: McGraw-Hill, 1980.

SALLES, M. H. D. et al. Avaliação simplificada de impactos ambientais na bacia do Alto Sorocaba (SP). *REA – Revista de Estudos Ambientais*, v. 10, p. 6–20, 2008.

SOARES-FILHO, Britaldo et al. Cracking Brazil's forest code. *Science*, v. 344, n. 6182, p. 363–364, 2014.

SONG, X. P. et al. Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, v. 560, n. 7720, p. 639–643, 2018.

SPAROVEK, Gerd et al. A revisão do Código Florestal Brasileiro. *Novos Estudos CEBRAP*, n. 89, p. 111–135, 2011.

STRASSBURG, Bernardo B. N. et al. Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*, v. 586, p. 724–729, 2020.

TALUKDAR, S. et al. Land-use land-cover classification by machine learning classifiers for satellite observations: a review. *Remote Sensing*, v. 12, n. 7, p. 1135, 2020.

EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE DRENAGEM UTILIZANDO DADOS ANADEM NA MICROBACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO LARANJAL, NOVA ANDRADINA/MS

1 Thiago Farias Duarte, 2 Apolo Moreno Rodrigues, 3 Guilherme Herculano de Oliveira, 4 Matheus Martins de Araujo Irabi, 5 Geraldo Augusto da Silva, 6 Thalita Farias Duarte, 7 Ariel Ortiz Gomes

1 Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), e-mail: eng.thiagoduarte@gmail.com; 2 Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), e-mail: contato.apolomoreno@gmail.com; 3 Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), e-mail: guiherc20@gmail.com; 4 Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), e-mail: matheus.irabi@uems.br; 5 Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), e-mail: geraldoanambi@gmail.com; 6 Prefeitura Municipal de Campo Grande/MS, e-mail: duarte.thalita@gmail.com, 7 Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), e-mail: ariel.gomes@ufms.br.

Palavras-chave: Extração Automática de Drenagem; ANADEM; Geotecnologias.

Resumo

O conhecimento preciso da rede de drenagem de uma bacia hidrográfica é fundamental para a gestão dos recursos hídricos e o cumprimento da legislação ambiental. O presente trabalho atualiza estudo anterior (DUARTE, 2013) que utilizou dados SRTM para a extração automática de drenagem na microbacia hidrográfica do Córrego Laranjal, Nova Andradina/MS, empregando agora o ANADEM (Modelo Digital de Terreno para a América do Sul), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS em parceria com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), com resolução espacial de 30 metros e correção do viés causado pela vegetação, processado no software livre QGIS. Foram testados limiares de acumulação de fluxo de 150 e 200 células, cujos resultados foram comparados com as cartas topográficas da Diretoria de Serviços Geográficos do Exército Brasileiro (DSG) e validados em campo com 15 pontos de controle GPS, referenciados por imagens do satélite CBERS-4A (INPE, 2026). O limiar de 150 células gerou rede com 210 canais e comprimento total de 208.494 m, enquanto o limiar de 200 células resultou em 147 canais e 187.788 m. Em ambos os casos, a drenagem extraída apresentou boa coerência espacial com a hidrografia DSG nos canais principais, com detalhamento superior nas nascentes e tributários de menor ordem. Os resultados indicam que o ANADEM, aliado ao QGIS, constitui ferramenta eficaz, gratuita e acessível para a atualização e geração de redes de drenagem em microbacias hidrográficas brasileiras.

Introdução

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) — Lei n° 9.433/1997 (BRASIL, 1997) — define a bacia hidrográfica como a unidade territorial para a implementação da política e a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Tucci (2004) e Barrella et al. (2000) descrevem a bacia hidrográfica como um conjunto de terras drenadas cujas superfícies conduzem as águas do escoamento superficial até o ponto mais baixo, formando uma rede de drenagem composta por cursos d'água que convergem para um único exutório. A topografia, o tipo de solo, a litologia, a cobertura vegetal e a pluviosidade regional determinam as feições e a densidade dessa rede, sendo que áreas relativamente impermeáveis apresentam drenagem mais densa do que as mais permeáveis (FONTES, 2010).

A identificação da rede de drenagem em diferentes escalas — riachos, córregos e rios — é ferramenta indispensável para a aplicação da PNRH, do Código Florestal (BRASIL, 2012) e da Resolução CONAMA n° 357/2005 (BRASIL, 2005), que regulamentam, entre outros aspectos, as Áreas de Preservação Permanente (APP) em corpos hídricos, bem como as outorgas e a cobrança pelo uso da água.

Historicamente, a obtenção de redes de drenagem se deu por meio das cartas topográficas da Diretoria de Serviços Geográficos do Exército Brasileiro (DSG); entretanto, essas cartas datam dos anos 1970 (EXÉRCITO BRASILEIRO, 2025) e carecem de atualização. Com o avanço das geotecnologias e do sensoriamento remoto, o aumento da capacidade de processamento e a redução de custos (OLIVEIRA et al., 2009), novos métodos baseados em Modelos Digitais de Elevação (MDE) tornaram-se disponíveis. Valeriano (2004) destacou que o processamento de MDEs por técnicas digitais de manipulação de topografia permite melhor interpretação de dados de drenagem, curvatura e declividade, com maior detalhamento do que o obtido por métodos convencionais.

Nesse contexto, surge o ANADEM (Modelo Digital de Terreno para a América do Sul), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em parceria com a ANA (UFRGS, 2024). O ANADEM é derivado do MDE Copernicus GLO-30, com a remoção do viés causado pela vegetação, possuindo resolução espacial de 30 metros e cobertura de toda a América do Sul, disponível gratuitamente sob licença Creative Commons CC BY 4.0 (ANA, 2024; LAIPELT et al., 2024). Diferentemente do SRTM — que registra a superfície do dossel vegetal — o ANADEM representa o terreno subjacente, o que resulta em maior acurácia na modelagem do escoamento hídrico superficial, especialmente em áreas de mata ciliar e floresta ripária.

O presente trabalho atualiza estudo anterior (DUARTE, 2013) que empregava dados SRTM e o SIG ArcGIS 9 para a extração automática de drenagem na microbacia do Córrego Laranjal, Nova Andradina/MS. A atualização substitui o SRTM pelo ANADEM e o ArcGIS pelo software livre QGIS — Quantum Geographic Information System (QGIS DEVELOPMENT

TEAM, 2026) — e utiliza imagens do satélite CBERS-4A (INPE, 2026) como referência visual atualizada na validação dos resultados, com o objetivo de avaliar a qualidade da extração automática de drenagem por meio de dado e ferramenta livres e verificar a coerência dos resultados frente à cartografia oficial DSG.

Material e Métodos

Área de Estudo

A microbacia hidrográfica do Córrego Laranjal (Figura 1) está localizada no município de Nova Andradina, Mato Grosso do Sul, inserida na bacia hidrográfica do Rio Ivinhema, afluente do Rio Paraná. A área da microbacia é de aproximadamente 40.299 ha, com perímetro de 114.743 m, conforme extração realizada neste estudo. A área encontra-se fortemente antropizada, com uso predominante de atividades agropecuárias, incluindo cultivo de cana-de-açúcar e criação de bovinos, padrão de ocupação semelhante ao documentado por Duarte (2013).

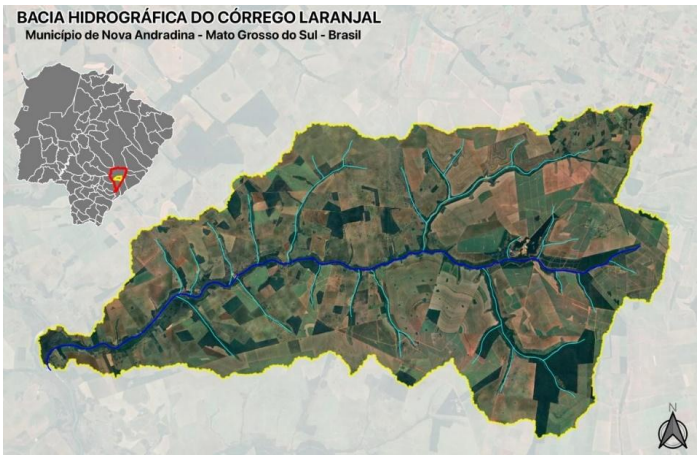


Figura 01: Visão geral da microbacia hidrográfica do Córrego Laranjal, com drenagem principal (azul) e afluentes (verde) e imagem CBERS-4ª de fundo. A linha amarela delimita o contorno da microbacia. Sem escala.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Base de Dados

Os dados utilizados foram: (a) ANADEM versão 1.0, com resolução espacial de 30 m, desenvolvido pelo IPH/UFRGS em parceria com a ANA (UFRGS, 2024), disponível no repositório do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH/ANA) sob licença CC BY 4.0; (b) cartas topográficas DSG nas folhas IVINHEMA-SF-22-Y-A-I (escala 1:100.000), XAVANTINA-SF-22-V-C (1:250.000) e NOVAANDRADINA-SF-22-Y-A-II (1:100.000), datadas de 1973; e (c) imagem do satélite CBERS-4A, sensor WPM, cena CBERS_4A_WPM_20260323_212_141_L4, nível de processamento L4 (ortorretificado), com resolução espacial de 2 m (pancromática) e 8 m (multiespectral), adquirida em 23 de março de 2026 (INPE, 2026). A Tabela 01 apresenta a ficha técnica do sensor.

Parâmetro	Descrição
Satélite / Sensor	CBERS-4A / WPM (Wide Field Panchromatic and Multispectral Camera)
ID da Cena	CBERS_4A_WPM_20260323_212_141_L4
Data de Aquisição	23/03/2026
Órbita/Ponto	212/141
Nível de Processamento	L4 – Ortorretificado
Resolução Espacial	8 m (multiespectral) / 2 m (pancromática)
Faixas Espectrais	Vermelho, Verde, Azul, Infravermelho Próximo (NIR), Pancromática (0,45–0,90 µm)

Tabela 01: Ficha técnica do satélite e sensor CBERS-4A/WPM utilizado na validação dos resultados.
Fonte: INPE (2026).

Processamento dos Dados

Todo o processamento foi realizado no software livre QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2026), por meio das ferramentas da extensão *GRASS* (GRASS GIS, 2026). Para a extração automática dos limites da microbacia e da rede de drenagem, o ANADEM foi processado por meio das ferramentas de análise hidrológica. Inicialmente, aplicou-se a ferramenta *Fill* para o preenchimento de depressões espúrias no Modelo Digital do Terreno (MDT), eliminando imperfeições que poderiam comprometer a modelagem do escoamento. O MDT preenchido foi utilizado como dado de entrada para o cálculo da direção de fluxo (*Flow Direction*) e, a partir deste, do fluxo acumulado (*Flow Accumulation*).

Para a delimitação dos limites da microbacia, selecionou-se o ponto mais a jusante com maior concentração de fluxo e aplicou-se a ferramenta *Watershed*, que define a área de contribuição para aquele ponto de controle. Para a extração da rede de drenagem, foram testados dois limiares de fluxo acumulado: 150 e 200 células, gerando duas versões da hidrografia — uma mais densa (limiar 150) e uma mais generalizada (limiar 200). Por meio da ferramenta *Conditional*, o raster de fluxo acumulado foi reclassificado e convertido em feições vetoriais lineares representando os canais de drenagem.

Após a vetorização, aplicou-se a ferramenta Suavizar do QGIS/GDAL, com o parâmetro de iteração configurado para 30, visando eliminar ângulos agudos decorrentes da grade raster e representar adequadamente a sinuosidade natural dos canais.

Conforme as escalas das bases de dados utilizadas, com destaque para a carta XAVANTINA-SF-22-V-C, adotou-se a escala de 1:250.000 para a presente pesquisa. Como a referida carta possui menor escala entre as bases, o estudo foi conduzido mediante essa adequação.

Validação em Campo

Para a validação em campo, foram elaborados *layouts* contendo a imagem CBERS-4A como plano de fundo, a hidrografia DSG e as drenagens extraídas automaticamente a partir do ANADEM (limiares 150 e 200). As bandas espectrais da imagem foram fusionadas com a banda pancromática, obtendo 2m de resolução espacial. A composição utilizada foi a 1(Red), 4 (NIR), 3 (Blue), visto que a banda NIR reflete a vegetação de forma eficiente (INPE, 2025). Foram registrados 15 pontos de controle GPS, localizados predominantemente em áreas de nascente ou confluência de canais, com erro posicional inferior a 15 metros. A localização de cada ponto foi comparada às drenagens sobrepostas à imagem CBERS-4A, permitindo avaliar a coerência espacial dos resultados.

Resultados e Discussão

A Tabela 02 apresenta a síntese dos resultados obtidos na extração automática da rede de drenagem e da microbacia hidrográfica com o ANADEM nos dois limiares testados, em confronto com a hidrografia da DSG.

Produto	Área da bacia (ha)	Perímetro da BH (m)	N° de canais	Comprimento total dos canais (m)
ANADEM – limiar 150	40.299,16	114.743,16	210	208.494
ANADEM – limiar 200	40.299,16	114.743,16	147	187.788
DSG	–	–	48	120.056

Tabela 02: Resultados de extração automática de drenagem com dados ANADEM e hidrografia DSG.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os dois limiares testados para o ANADEM geraram áreas de drenagem e perímetros de bacia idênticos (40.299,16 ha e 114.743,16 m, respectivamente), diferindo apenas no nível de detalhamento da rede de canais. O limiar de 150 células resultou em 210 canais e comprimento total de 208.494 m — acréscimo de 63 canais (43%) e 20.706 m (11%) em relação ao limiar de 200. Em comparação com a hidrografia DSG (48 canais e 120.056 m), ambas as versões ANADEM apresentaram substancial incremento na densidade da rede, evidenciando maior capacidade de detecção de canais de menor ordem, especialmente nascentes e tributários, resultado consistente com o observado no estudo anterior com dados SRTM (DUARTE, 2013).

A vantagem metodológica do ANADEM em relação ao SRTM reside justamente na correção do viés da vegetação: enquanto o SRTM registra a superfície do dossel florestal, o ANADEM representa o terreno subjacente (LAIPELT et al., 2024). Isso tende a posicionar os canais de drenagem de forma mais precisa, em especial em áreas de mata ciliar ou galeria, onde no SRTM o programa poderia interpretar as bordas do dossel como falsos canais de escoamento (fenômeno documentado por DUARTE, 2013). A Figura 02 ilustra os limites da microbacia sobre as folhas topográficas DSG.

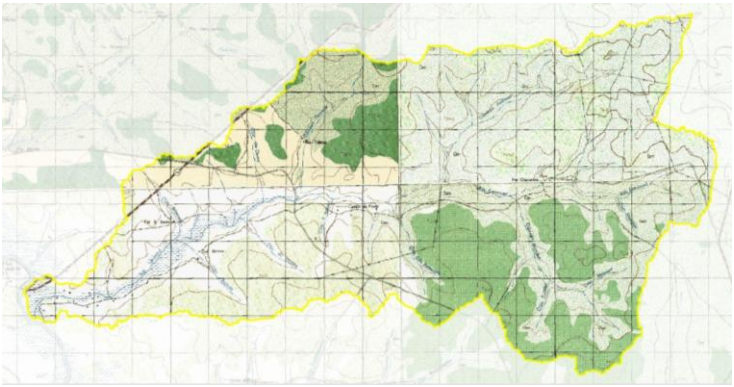


Figura 02: Delimitação da microbacia hidrográfica do Córrego Laranjal sobreposta às folhas topográficas DSG. A linha amarela indica o limite da microbacia extraído automaticamente. Sem escala.
Fonte: Cartas DSG IVINHEMA-SF-22-Y-A-I-100.000, XAVANTINA-SF-22-V-C-250.000 e NOVA ANDRADINA-SF-22-Y-A-II-100.000 (DSG, 1973).

A validação em campo por meio dos 15 pontos de controle GPS, com sobreposição às imagens CBERS-4A, confirmou a adequação geral da rede de drenagem extraída pelo ANADEM. Os canais gerados acompanham as faixas de vegetação ripária visíveis na imagem de alta resolução, indicando boa correspondência com os corpos d'água reais. Em vários pontos de validação, o ANADEM com limiar 150 mapeou canais de nascente não presentes na hidrografia DSG, mas confirmados visualmente pela análise das imagens CBERS-4A — padrão anteriormente identificado com dados SRTM (DUARTE, 2013). Nos Pontos 03, 04 e 06, a drenagem DSG estava ausente, ao passo que o ANADEM identificou corretamente canais visíveis no satélite. Nos trechos dos canais principais, o ANADEM-200 apresentou maior aderência ao corredor de vegetação ripária visível no satélite, com deslocamentos laterais em relação à DSG atribuíveis à imprecisão posicional das cartas de 1973.

O Ponto 07 (Figura 03) exemplifica o padrão geral observado: o ANADEM-150 mapeia um canal de nascente com início em área de vegetação nativa não representado na carta DSG, cuja existência é confirmada pela faixa de vegetação ripária visível no CBERS-4A.



Figura 03: Comparação no Ponto 07 entre as drenagens DSG (vermelho), ANADEM-200 (verde) e ANADEM-150 (azul) sobrepostas à imagem CBERS-4A. O detalhe (topo direito) evidencia o canal de nascente mapeado pelo ANADEM-150 ausente na carta DSG, confirmado pela faixa de vegetação ripária visível no satélite. Sem escala. Fonte: CBERS_4ª_WPM_20260323_212_141_L4 (INPE, 2026); DSG (1973); ANA/UFRGS (2024).

Nos Pontos 03, 04 e 06, a drenagem DSG estava ausente na área do ponto de controle, ao passo que o ANADEM identificou corretamente os canais visíveis no satélite. A Figura 04 (Ponto 03) ilustra esse cenário: em área de uso agrícola intensivo, o ANADEM mapeia um canal de nascente confirmado pela vegetação ripária na imagem, porém omitido na carta DSG de 1973. Essa lacuna é atribuída à escala de levantamento (1:100.000) e à data de produção das cartas, que não capturavam canais intermitentes e de menor ordem, hoje visíveis em imagens de alta resolução.

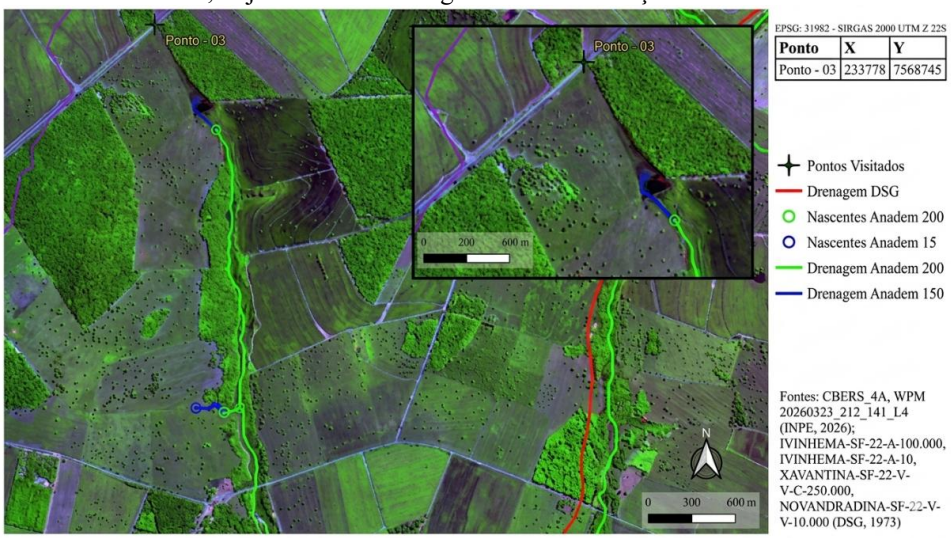


Figura 04: Comparação no Ponto 03 entre as drenagens ANADEM-200 (verde) e ANADEM-150 (azul) sobrepostas à imagem CBERS-4A. A drenagem DSG está completamente ausente na área, e o ANADEM identifica canais de nascente confirmados pela faixa de vegetação ripária visível no satélite. Sem escala. Fonte: CBERS_4A_WPM_20260323_212_141_L4 (INPE, 2026); DSG (1973); ANA/UFRGS (2024).

Situação semelhante foi registrada nos Pontos 08, 09, 10, 14 e 15, todos em zonas de cabeceira de drenagem com fragmentos florestais. A Figura 05 documenta os Pontos 08 e 09 em localizações contíguas: o ANADEM — especialmente com limiar de 150 células — mapeia canais de nascente não representados na carta DSG, confirmados pela faixa de vegetação ripária nas imagens CBERS-4A. Nos demais pontos desse grupo (10, 14 e 15), o mesmo comportamento foi observado, com o ANADEM-150 identificando canais de cabeceira ausentes ou subdimensionados na hidrografia convencional.

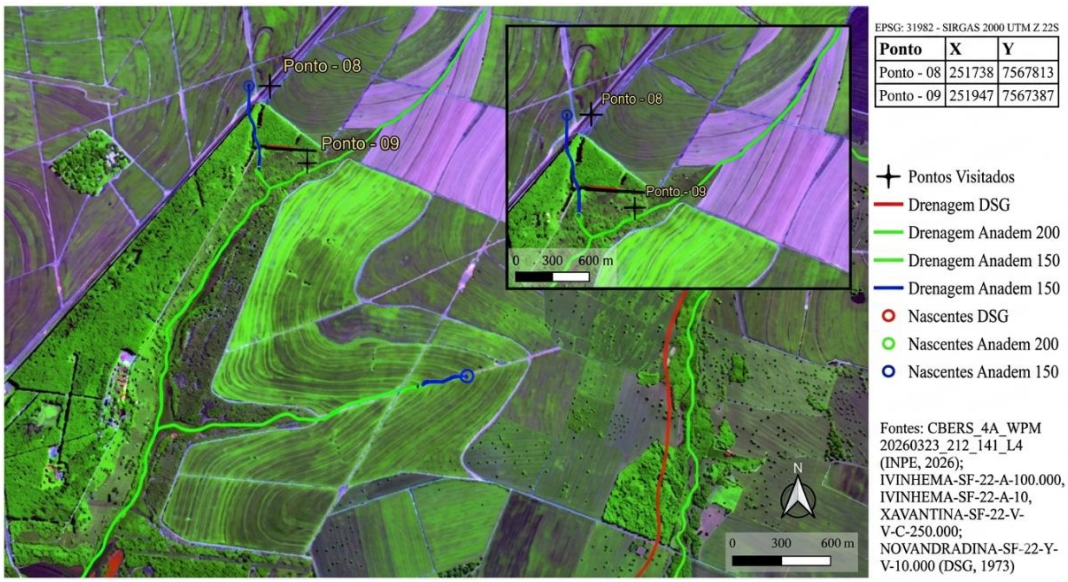


Figura 05: Comparação nos Pontos 08 e 09 entre as drenagens ANADEM-200 (verde) e ANADEM-150 (azul) sobrepostas à imagem CBERS-4A. O detalhe (topo direito) evidencia dois pontos contíguos em zona de cabeceira com fragmentos florestais, onde o ANADEM mapeia canais de nascente não representados na carta DSG, confirmados pela vegetação ripária visível no satélite. Sem escala.
Fonte: CBERS_4A_WPM_20260323_212_141_L4 (INPE, 2026); DSG (1973); ANA/UFRGS (2024).

No Ponto 01 (Figura 06), observa-se deslocamento lateral entre a DSG (vermelho) e o ANADEM-200 (verde) no canal principal: enquanto o ANADEM-200 acompanha o corredor de vegetação ripária visível na imagem CBERS-4A, a DSG está posicionada fora desse corredor, evidenciando imprecisão posicional da cartografia convencional de 1973. O ANADEM-150 estende o mapeamento em direção às nascentes, confirmadas pela vegetação ripária na imagem de satélite. Padrão análogo foi observado no Ponto 02, com comportamento espacial equivalente.

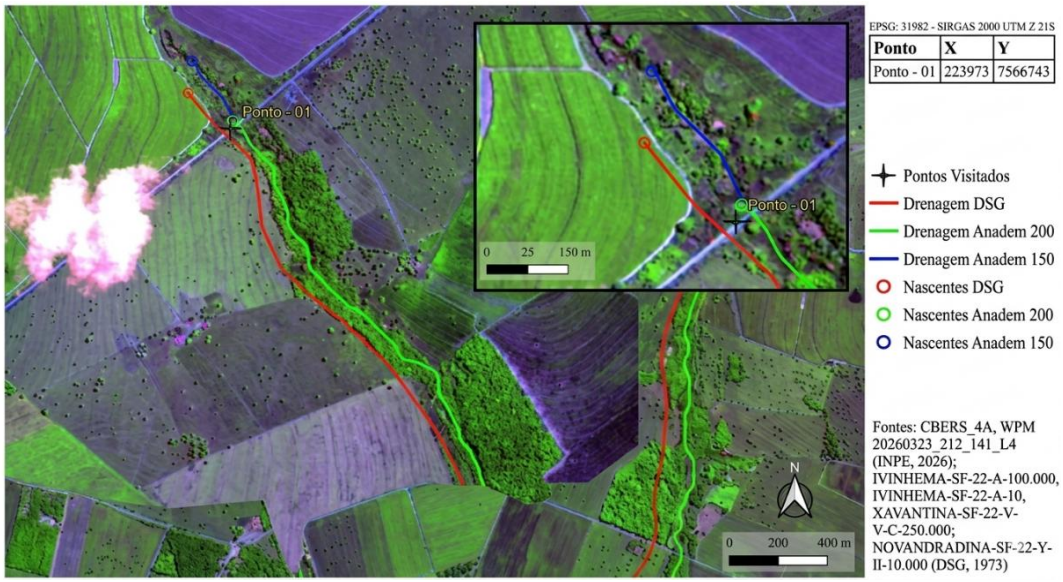


Figura 06: Comparação no Ponto 01 entre as drenagens DSG (vermelho), ANADEM-200 (verde) e ANADEM-150 (azul) sobrepostas à imagem CBERS-4A. No canal principal, o ANADEM-200 acompanha o corredor de vegetação ripária visível no satélite, enquanto a DSG apresenta deslocamento lateral em relação ao corpo d'água real; o ANADEM-150 estende o mapeamento em direção à nascente. Sem escala.
Fonte: CBERS_4A_WPM_20260323_212_141_L4 (INPE, 2026); DSG (1973); ANA/UFRGS (2024).

Nos Pontos 11, 12 e 13, situados em área de transição entre cultivo agrícola e fragmento florestal, as três representações se aproximaram espacialmente no canal principal, enquanto o ANADEM-150 ampliou o mapeamento para as cabeceiras. A Figura 07 documenta essa situação: mesmo em paisagens predominantemente agrícolas, o ANADEM preserva a capacidade de detectar canais de menor ordem associados a fragmentos de vegetação nativa remanescente, reforçando sua aplicabilidade em microbacias altamente antropizadas.

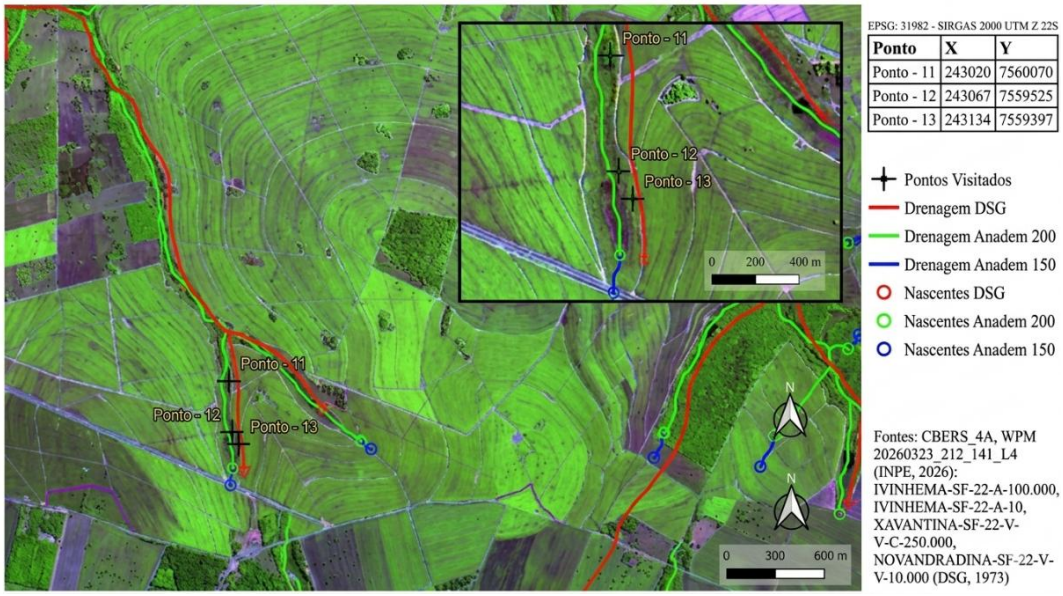


Figura 07: Comparação nos Pontos 11, 12 e 13 entre as drenagens DSG (vermelho), ANADEM-200 (verde) e ANADEM-150 (azul) sobrepostas à imagem CBERS-4A. Em área de transição entre cultivo agrícola e fragmento florestal, as três representações coincidem no canal principal, enquanto o ANADEM-150 amplia o mapeamento para as cabeceiras. Sem escala. Fonte: CBERS_4A_WPM_20260323_212_141_L4 (INPE, 2026); DSG (1973); ANA/UFRGS (2024).

De modo geral, os resultados obtidos com o ANADEM superam o nível de detalhe da cartografia convencional DSG (escala 1:100.000) nos canais de menor ordem. A vantagem metodológica reside na correção do viés da vegetação (LAIPELT et al., 2024): enquanto o SRTM registra a superfície do dossel florestal, o ANADEM representa o terreno subjacente, posicionando os canais de forma mais precisa, em especial em áreas de mata ciliar. A adoção do QGIS como plataforma de processamento demonstrou que a extração automática de drenagem por SIG livre é viável, reproduzível e adequada para fins de gestão e monitoramento de recursos hídricos.

Considerações Finais

O presente trabalho demonstrou que o ANADEM, processado no software livre QGIS, constitui uma ferramenta eficaz para a extração automática da rede de drenagem e dos limites da microbacia hidrográfica do Córrego Laranjal, Nova Andradina/MS. A validação com 15 pontos de controle GPS e a comparação visual com imagens CBERS-4A de alta resolução confirmaram a adequação espacial dos resultados frente à hidrografia de referência DSG.

O limiar de acumulação de fluxo de 150 células gerou a rede mais densa (210 canais, 208.494 m), com maior representação dos canais de menor ordem e de nascentes, sendo adequado para estudos que exigem maior detalhamento hidrográfico. O limiar de 200 células resultou em rede mais generalizada (147 canais, 187.788 m), compatível com análises de escala regional.

A principal vantagem do ANADEM frente ao SRTM, explorado no estudo anterior desta mesma área, é a correção do viés causado pela vegetação, que posiciona os canais de drenagem de forma mais precisa sobre o terreno real, minimizando os efeitos de falsos canais ao longo de dosséis florestais. Aliado ao QGIS, ferramenta livre e acessível, o ANADEM representa um avanço relevante para a atualização de redes hidrográficas brasileiras, com aplicações diretas na fiscalização ambiental das APPs, na gestão de recursos hídricos e na implementação da PNRH.

Estudos complementares comparando diretamente os resultados obtidos com SRTM e com ANADEM, em termos de acurácia posicional e completude da rede de drenagem, constituem desdobramento natural deste trabalho e estão em desenvolvimento pelos autores.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), através do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2023. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

Referências Bibliográficas

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. ANADEM – Modelo Digital de Terreno para a América do Sul: metadados. Brasília: ANA, 2024. Disponível: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/93664c15-1ff8-4e87-bbed-2bb69d321309. Acesso em: 04 abr. 2026.

BARRELLA, W.; PETRERE JR., M.; SMITH, W. S.; MONTAG, L. F. A. As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H. F. (Ed.). Matas ciliares: conservação e recuperação. São Paulo: EDUSP/FAPESP, 2000.

BEZERRA, U. A.; ANDRADE, J. M.; ANDRADE, J. B.; RUFINO, I. A. Extração de rede de drenagem por diferentes tipos de MDE. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE E SOCIEDADE (CONIMAS) E CONGRESSO INTERNACIONAL DE DIVERSIDADES (CONIDIS), 2019, Campina Grande. Anais [...] Campina Grande: Editora Realize, 2019.

BRASIL. Lei n° 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Política Nacional de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

BRASIL. Lei n° 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Brasília: Presidência da República, 2012.

BRASIL. Resolução CONAMA n° 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Brasília: CONAMA, 2005.

COPERNICUS. Homepage. Bruxelas: União Europeia, 2026. Disponível em: https://www.copernicus.eu/en. Acesso em: 01 abr. 2026.

DSG – DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO BRASILEIRO. Carta Ivinhema. Folha SF-22-Y-A-I. Escala 1:100.000. 1973.

DSG – DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO BRASILEIRO. Carta Nova Andradina. Folha SF-22-Y-A-II. Escala 1:100.000. 1973.

DUARTE, T. F. Extração automática de drenagem utilizando dados SRTM da sub-bacia do Ribeirão Laranjal, Nova Andradina/MS. Anais Eletrônicos ABES, 2013. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/22_Download/TrabalhosCompletosPDF/IV-139.pdf. Acesso em: 08 abr. 2026.

EXÉRCITO BRASILEIRO. Histórico da Chefia do Geoportal. Brasília: Exército Brasileiro, 2025. Disponível em: https://geoportal.eb.mil.br/portal/index.php/chefia/historico. Acesso em: 10 abr. 2026.

FONTES, A. L. Geomorfologia fluvial e hidrografia: as redes de drenagem. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, CESAD, 2010.

GRASS GIS. GRASS GIS – Geographic Resources Analysis Support System. Disponível em: <https://grass.osgeo.org/>. Acesso em: 30 abr 2026.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Satélite CBERS-4A. São José dos Campos: INPE, 2026. Disponível em: https://data.inpe.br/dados/satelite-cbers-4a/. Acesso em: 05 abr. 2026.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. NOVA coleção de imagens fusionadas de alta resolução espacial do satélite/sensor CBERS-4A/WPM. INPE, 2025. Disponível em: <https://data.inpe.br/nova-colecao-de-imagens-fusionadas-de-alta-resolucao-espacial-do-satelite-sensor-cbers-4a-wpm/>. Acesso em: 30 abr 2026.

LAIPELT, L.; ANDRADE, B. C. C. DE; REICHERT, F. C.; AMORIM, A.; SILVA, A. H. DA; RUHOFF, A. ANADEM: A Digital Terrain Model for South America. Remote Sensing, v. 16, n. 13, p. 2321, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/rs16132321.

NASA. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Washington: NASA, 2024. Disponível em: https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/srtm. Acesso em: 03 abr. 2026.

OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A.; SALDANHA, D. L. Avaliação da qualidade da drenagem extraída a partir de dados SRTM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. Anais [...] Campo Grande:

ABRH, 2009.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, 2026. Disponível em: https://www.qgis.org. Acesso em: 01 abr. 2026.

RIBEIRO, A. A. et al. Extração automática de bacias hidrográficas e drenagem. Maringá: Uniedusul, 2024. E-book. ISBN 978-65-5418-069-6.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e prática. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2004.

UFRGS – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. ANADEM – Modelo Digital de Terreno para a América do Sul. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 2024. Disponível: https://www.ufrgs.br/hge/anadem-modelo-digital-de-terreno-mdt/. Acesso: 04 abr. 2026.

VALERIANO, M. M. Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul. São José dos Campos: INPE, 2004.

COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO ALOS PALSAR E SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION PARA ANÁLISE DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO XAMBRÊ, NOROESTE DO PARANÁ

1 Luiz Gustavo Mendes Pessoa, 2 Rodrigo Tartari

1Graduando em Engenharia Ambiental, Universidade Estadual de Maringá – Campus Regional de Umuarama, e-mail:ra140258@uem.br; Professor do Departamento de Engenharia Ambiental e de Computação, Universidade Estadual de Maringa – Campus regional de Umuarama.e-mail:rtartari@uem.br

Palavras-chave: Parâmetros Morfométricos; Geoprocessamento; Arenito Caiuá.

Resumo

Estudos hidrológicos em bacias hidrográficas são de extrema importância para gestão dos recursos hídricos com propósito de atender as presentes e futuras gerações. A segurança hídrica tem se tornado uma preocupação mundial diante o aumento da demanda por água e aumento das fontes de água poluídas. Geotecnologias são fundamentais para analise e gestão de bacias hidrográficas, com perspectivas de manejo, recuperação e monitoramento ambiental. Este trabalho tem como objetivo analisar modelos digitais de elevação com diferentes resoluções espaciais, utilizando técnicas de geoprocessamento para caracterizar parâmetros morfométricos da bacia hidrográfica do rio Xambrê, localizado no noroeste do Paraná. Para análise, foi utilizado o Modelo Digital de Elevação ALOS/PALSAR com uma resolução espacial de 12,5 m, utilizando o software QGIS, permitindo a extração de dados topográficos e hidrológicos. A bacia apresenta área de 1.313,46 Km^2, com um formato alongado em relevo suave ondulado e ondulado, formada em região geológica do arenito Caiuá, com solos arenosos. São 878 nascentes identificadas que formam a rede de drenagem atingindo no exutório da bacia, hierarquia de 5ª ordem, a densidade de drenagem com aproximadamente 0,89 (km/km^2). Os resultados indicam desenvolvimento moderado de rede hidrográfica, elevada sinuosidade do canal principal e menos propensão a picos de cheia. Os MDE (ALOS e SRTM) apresentam pouca diferença, sendo destaque a representação do MDE Alos com resolução de 12,5m em relação ao SRTM de 30 metros. O uso de geotecnologias é fundamental para diagnóstico ambiental da bacia, fornecendo suporte ao ordenamento territorial, à segurança hídrica e à gestão sustentável dos recursos hídricos.

Introdução

A água é um recurso natural essencial para o equilíbrio dos sistemas ambientais e para o desenvolvimento das atividades humanas. Sua importância vai além do abastecimento doméstico, sendo fundamental também para a produção agrícola, o setor industrial e a manutenção dos ecossistemas naturais. Nas últimas décadas, o aumento da demanda por água, aliado ao crescimento populacional e aos efeitos das mudanças climáticas, tem intensificado as preocupações relacionadas à segurança hídrica em diversas regiões do mundo. Esse cenário evidencia a necessidade de estudos que permitam compreender de forma integrada os fatores que influenciam a disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos (KHEDUN et al., 2026; IPCC, 2023).

As alterações provocadas pelas atividades antrópicas no meio ambiente têm contribuído significativamente para mudanças na dinâmica natural das bacias hidrográficas. A expansão urbana, o desmatamento, a agricultura intensiva e o uso inadequado do solo têm favorecido a ocorrência de processos erosivos, o transporte de sedimentos e o assoreamento dos cursos d'água. Essas transformações impactam diretamente tanto o meio físico quanto o meio biológico, comprometendo a qualidade da água e reduzindo a capacidade dos sistemas naturais de atender às demandas crescentes. Além disso, a disposição inadequada de resíduos sólidos e efluentes tem se configurado como um dos principais fatores de degradação ambiental, contribuindo para a contaminação das águas superficiais e subterrâneas (MOTA, 2020; SILVA , SCHULZ & CAMARGO 2007).

Diante desse contexto, a bacia hidrográfica é reconhecida como uma unidade territorial adequada para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, pois permite analisar de forma integrada os aspectos físicos, biológicos e socioeconômicos que influenciam a dinâmica ambiental. A abordagem baseada em bacias hidrográficas possibilita identificar áreas mais vulneráveis à degradação, compreender o comportamento do escoamento superficial e propor estratégias voltadas à conservação ambiental e ao uso sustentável dos recursos naturais. Dessa forma, o diagnóstico das características físicas da bacia torna-se uma etapa fundamental para o planejamento territorial e para a implementação de ações de gestão ambiental.

Nesse sentido, as geotecnologias têm se destacado como ferramentas eficientes para a análise espacial e para a obtenção de informações detalhadas sobre o ambiente. O uso de modelos digitais de elevação, sistemas de informação geográfica e técnicas de processamento de dados espaciais permite caracterizar com maior precisão o relevo, a rede de drenagem e os parâmetros morfométricos das bacias hidrográficas. Essas informações são fundamentais para compreender a dinâmica hidrológica, avaliar a suscetibilidade a processos erosivos e apoiar a tomada de decisões relacionadas ao uso e à conservação de recursos naturais. A água é um recurso natural essencial para o equilíbrio dos sistemas ambientais e para o desenvolvimento das atividades humanas. Sua importância vai além do abastecimento doméstico, sendo fundamental também para a produção agrícola, o setor industrial e a manutenção dos ecossistemas naturais. Nas últimas décadas, o aumento da demanda por água, aliado ao crescimento

populacional e aos efeitos das mudanças climáticas, tem intensificado as preocupações relacionadas à segurança hídrica em diversas regiões do mundo. Esse cenário evidencia a necessidade de estudos que permitam processos erosivos e apoiar a tomada de decisões relacionadas ao uso e à conservação dos recursos naturais.

A análise morfométrica de bacias hidrográficas representa uma importante etapa nesse processo, pois permite quantificar características físicas que influenciam diretamente o comportamento hidrológico. Parâmetros como área, forma da bacia, densidade de drenagem, ordem dos cursos da água e amplitude altimétrica são fundamentais para compreender a dinâmica do escoamento superficial e a resposta da bacia a eventos extremos, como períodos de chuvas intensas ou estiagens prolongadas.

Assim, estudos que utilizam geotecnologias associadas à análise morfométrica contribuem de forma significativa para o diagnóstico ambiental e para o planejamento sustentável dos recursos hídricos. Este trabalho tem como objetivo analisar modelos digitais de elevação com diferentes resoluções espaciais, utilizando técnicas de geoprocessamento para caracterizar parâmetros morfométricos da bacia hidrográfica do rio Xambrê, localizado no noroeste do Paraná.

Material e Métodos

Caracterização da Área

A bacia hidrográfica do rio Xambrê está localizada na região noroeste do estado do Paraná, inserida em uma área de predominância agrícola e marcada por intensas transformações antrópicas ao longo das últimas décadas. A região apresenta clima subtropical úmido, com precipitações bem distribuídas ao longo do ano, o que favorece a manutenção dos recursos hídricos e influencia diretamente o regime hidrológico da bacia. O relevo é caracterizado como suavemente ondulado, com variações altimétricas moderadas, condicionando o escoamento superficial e a organização da rede de drenagem. Os solos predominantes são arenosos, fator que contribui para maior vulnerabilidade à erosão hídrica, especialmente em áreas com manejo inadequado. A cobertura vegetal original foi amplamente substituída por atividades agropecuárias, o que impacta diretamente a dinâmica ambiental e os processos hidrológicos. A bacia apresenta formato alongado, característica que influencia o tempo de concentração e reduz a ocorrência de picos de cheia. Esses aspectos tornam a área relevante para estudos voltados à análise morfométrica e ao planejamento ambiental.

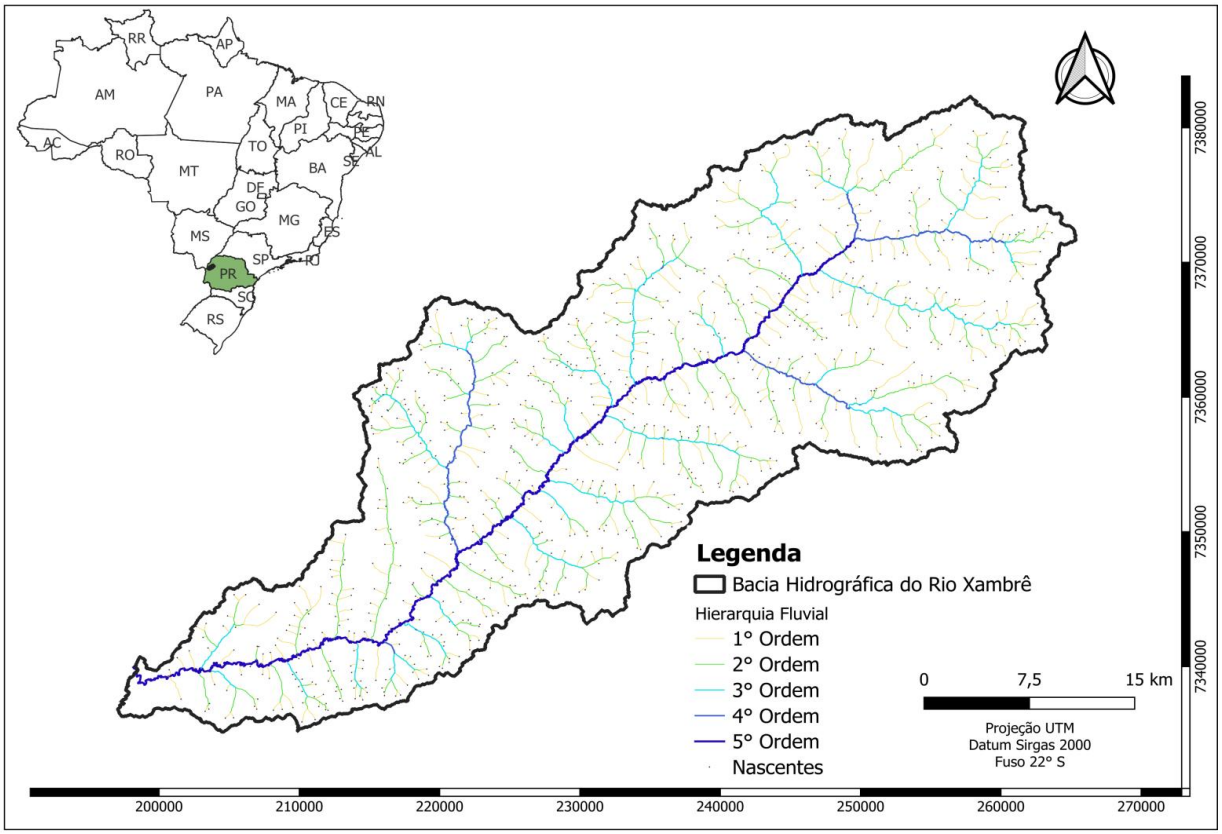


Figura 1. Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Xambrê

A delimitação da bacia hidrográfica, a extração da rede de drenagem e a análise dos parâmetros morfométricos e hidrológicos foram realizadas por meio de técnicas de geoprocessamento. Para isso, utilizou-se o software QGIS versão 3.40.1, devido à sua ampla capacidade de integração de ferramentas e precisão no tratamento de dados espaciais.

A definição dos limites da área de estudo foi baseada na análise integrada de cartas topográficas do Exército Brasileiro e do Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta resolução, proveniente do sensor PALSAR, a bordo do satélite ALOS. O MDE apresenta resolução espacial de 12,5 m e foi obtido junto à Alaska Satellite Facility (ASF).

O pré-processamento do MDE foi realizado por meio da ferramenta "r.fill.dir", disponível no GRASS GIS integrado ao ambiente do QGIS, com o objetivo de eliminar depressões espúrias (sinks) e corrigir inconsistências nos dados de elevação. Esse procedimento resultou em um modelo hidrologicamente consistente, adequado para análises subsequentes.

A extração da rede de drenagem e a determinação da direção de fluxo foram conduzidas com a ferramenta "r.watershed". Posteriormente, com base no raster de acumulação de fluxo e na definição do ponto de exutório, utilizou-se a ferramenta "r.water.outlet" para delimitação da bacia hidrográfica. Os dados gerados em formato raster foram convertidos para formato vetorial, possibilitando maior precisão nas análises espaciais.

A hierarquização da rede de drenagem foi realizada conforme o método proposto por Strahler (1952), permitindo a classificação dos cursos da água de acordo com sua ordem hierárquica.

Com o intuito de garantir maior confiabilidade, a rede de drenagem obtida foi comparada com imagens de satélite e cartas topográficas do exército, sendo realizadas correções manuais quando necessário. Para essa etapa, utilizou-se imagem do satélite CBERS-4A, sensor WPM, adquirida em 03 de agosto de 2022, sem cobertura de nuvens, empregando-se as composições coloridas para realçar diferentes alvos, sendo em cor verdadeira (RGB 321) para visualização natural, e em falsa-cor (RGB 432) para realce da vegetação.

Parâmetros morfométricos e hidrológicos

A caracterização morfométrica da bacia hidrográfica foi realizada a partir de parâmetros clássicos descritos na literatura. A área (A) e o perímetro (P) foram obtidos diretamente dos dados vetoriais gerados no ambiente SIG.

O comprimento axial da bacia (La), definido como a distância entre a nascente e o exutório, foi utilizado no cálculo do comprimento médio da bacia (Lm), conforme a Equação (1):

$$Lm = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{La}}$$

O fator de forma (Kf), proposto por Villela e Mattos (1975), foi empregado para avaliar a tendência à ocorrência de enchentes, sendo definido pela Equação (2):

$$Kf = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{La}^2}$$

O coeficiente de compacidade (Kc), também denominado índice de Gravelius, foi calculado pela razão entre o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de área equivalente, conforme a equação (3):

$$Kc = 0{,}28\frac{\mathrm{P}}{\sqrt{\mathrm{A}}}$$

Esse coeficiente permite inferir a suscetibilidade a enchentes, sendo que valores menores indicam bacias mais compactas e maior propensão a eventos de cheia rápida.

O índice de circularidade (Ic), proposto por Miller (1953), foi utilizado para avaliar a forma da bacia hidrográfica, conforme a Equação (4):

$$Ic = 12{,}57\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{P}^2}$$

A razão de elongação (Re), conforme Schumm (1956), foi empregada para caracterizar o grau de alongamento da bacia, sendo determinada pela Equação (5):

$$Re = 1{,}128\frac{\sqrt{\mathrm{A}}}{\mathrm{L}a}$$

Características Morfométricas	Alos Palsar	SRTM	Unidade
Área de drenagem (A)	1313,46	1311,38	Km²
Perímetro (P)	328,296	317,402	Km
Comprimento axial da bacia (La)	75,279	75,476	Km
Largura média da bacia (Lm)	17,448	17,374	Km
Coeficiente de compacidade (Kc)	2,53	2,45	Adimensional
Fator de forma (Kf)	0,2317	0,2302	Adimensional
Índice de circularidade (Ic)	0,153	0,163	Adimensional
Razão de elongação (Re)	0,54	0,54	Adimensional
Forma da bacia	Alongada	Alongada	-

Tabela 1. Características morfometricas comparativas da bacia do rio Xambrê

Resultados e Discussão

A análise comparativa entre os Modelos Digitais de Elevação (MDE) ALOS/PALSAR e SRTM evidenciou elevada similaridade nos parâmetros morfométricos da bacia hidrográfica do rio Xambrê, indicando consistência entre os dados utilizados. A área de drenagem apresentou valores muito próximos entre os modelos, assim como o comprimento axial e a largura média da bacia, demonstrando confiabilidade na delimitação espacial. Os índices morfométricos, como fator de forma, coeficiente de compacidade, índice de circularidade e razão de elongação, classificam a bacia como alongada, sugerindo menor propensão a enchentes rápidas e maior tempo de resposta hidrológica. A rede de drenagem apresentou desenvolvimento

moderado, com organização hierárquica bem definida, sendo classificada como de 5ª ordem segundo o método de Strahler. A identificação de 878 nascentes reforça a importância hídrica da bacia e sua capacidade de contribuição para o sistema fluvial regional. A elevada sinuosidade do canal principal contribui para a dissipação da energia do fluxo, reduzindo a velocidade da água e minimizando processos erosivos intensos em determinados trechos. As análises hipsométricas e de declividade demonstraram pequenas variações entre os modelos, sendo o ALOS/PALSAR mais detalhado devido à sua maior resolução espacial. Essa característica permite melhor representação das feições do relevo, especialmente em áreas com variações mais sutis. No entanto, o SRTM também apresentou resultados satisfatórios, mostrando-se adequado para estudos em escala regional. Do ponto de vista ambiental, a presença de solos arenosos associada ao uso intensivo do solo potencializa processos erosivos e o transporte de sedimentos, o que pode comprometer a qualidade da água da bacia.

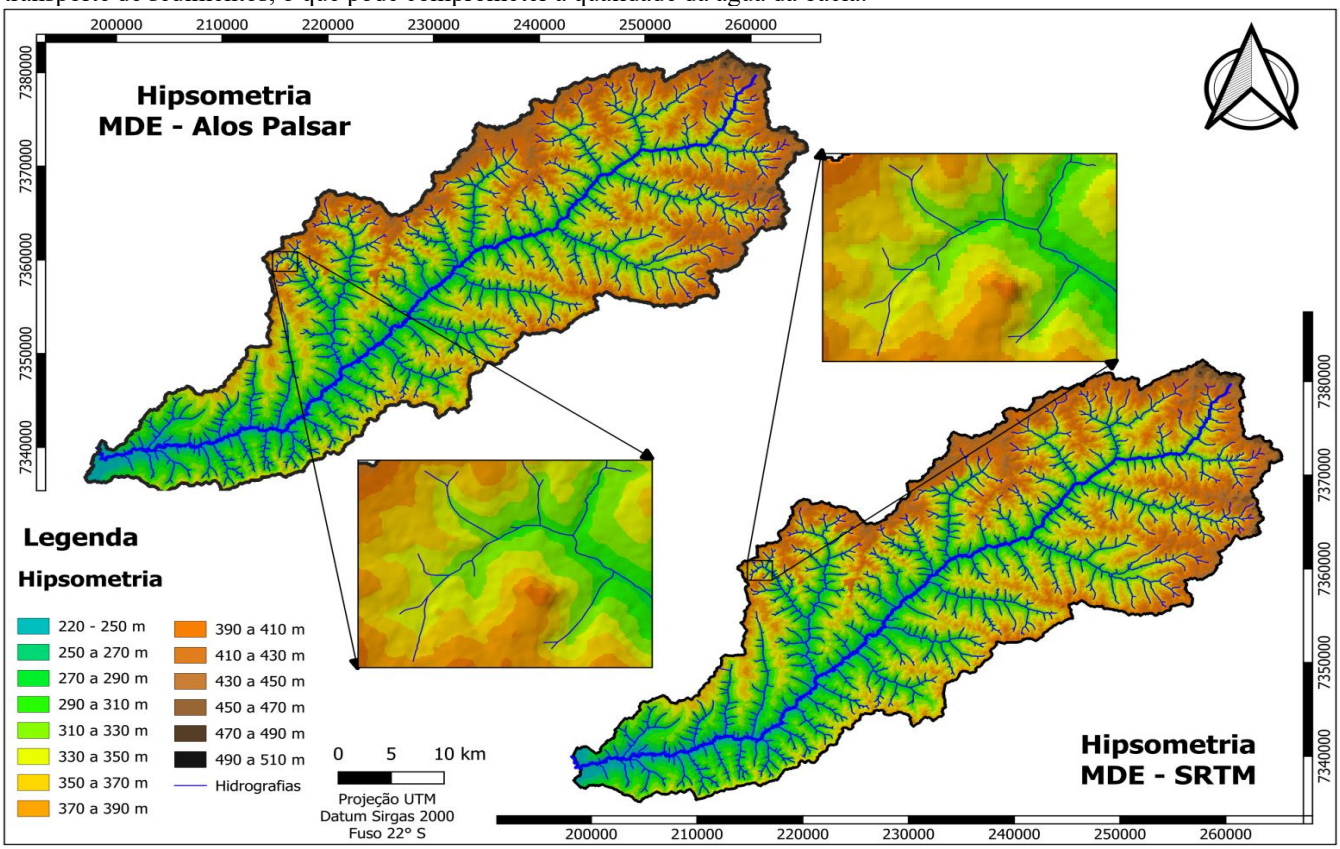


Figura 2. Mapa Hipsometrico (A) SRTM e (B) Alos Plasar

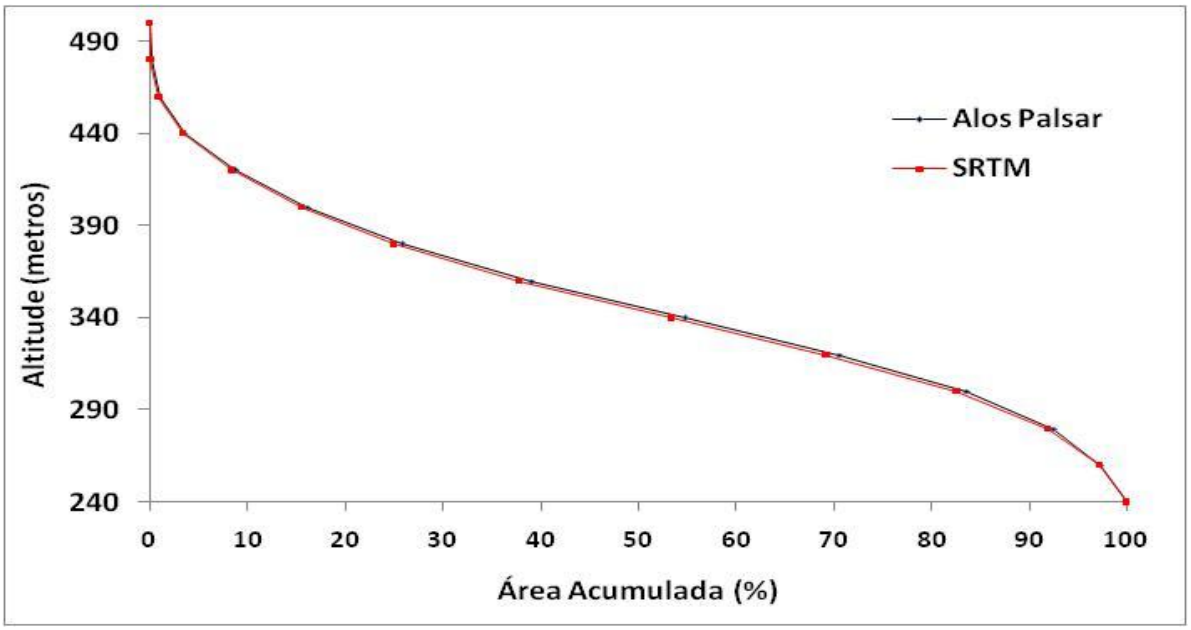


Figura 3. Distribuição de Classe Hipsometricas entre o MDE SRTM e ALos Palsar

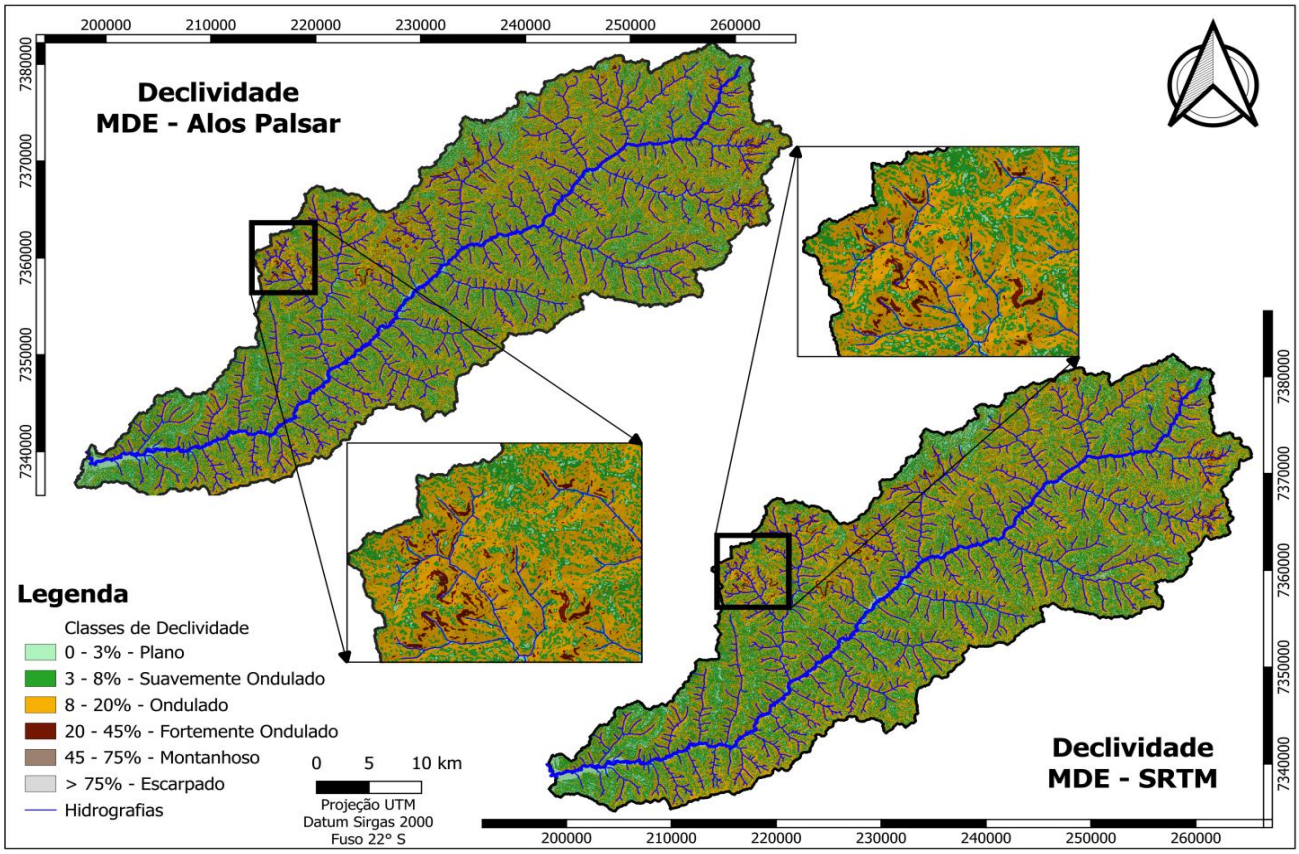


Figura 4. Mapa de Declividade (A) SRTM e (B) Alos Plasar

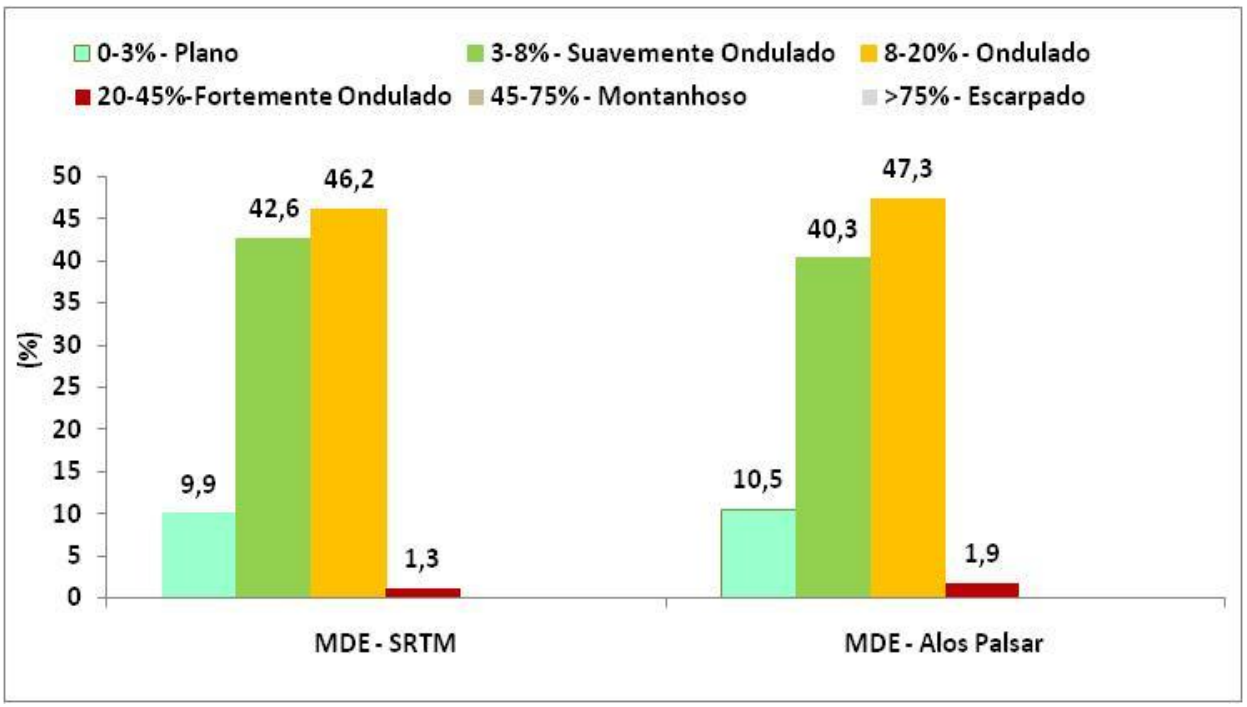


Figura 5. Distribuição de declividade comparativa entre os MDE SRTM Alos Palsar.

A análise das classes de declividade, expressa na Figura 5, demonstra que a bacia é predominantemente composta por relevo ondulado e suavemente ondulado, totalizando cerca de 90% da área em ambos os modelos.

O MDE ALOS PALSAR, devido à sua resolução de 12,5 metros, identifica uma proporção ligeiramente maior de áreas com declividade entre 8-20% (47,3%) em comparação ao SRTM (46,2%), o que é fundamental para mapear zonas de risco à erosão em solos arenosos. No que diz respeito à hipsometria, o gráfico de área acumulada exibe curvas quase sobrepostas, validando a consistência dos dados de altitude que variam de 220 a 510 metros.

Os mapas hipsométricos apresentados na Figura 2, ilustram uma transição suave de cores, onde o modelo ALOS PALSAR oferece uma representação visual superior das quebras de relevo e das cabeceiras de drenagem. O mapa de localização e hierarquia fluvial evidencia uma rede densa de 5ª ordem, com 878 nascentes distribuídas de forma capilar por toda a extensão da bacia. A sinuosidade acentuada do canal principal, visível nos vetores azuis, aliada ao formato alongado da bacia comprovado pelos índices morfométricos, indica um sistema hidrológico eficiente na dissipação de energia.

Essa configuração espacial sugere que, apesar da menor propensão a picos de cheia, a fragilidade pedológica exige atenção especial nas áreas de maior declividade detectadas. As geotecnologias aplicadas, portanto, não apenas quantificam a bacia, mas fornecem um diagnóstico visual preciso que suporta a necessidade de práticas conservacionistas urgentes para a manutenção da segurança hídrica regional.

Considerações Finais

Os resultados obtidos demonstram que tanto o MDE ALOS PALSAR quanto o SRTM são ferramentas eficientes para a caracterização morfométrica de bacias hidrográficas, apresentando resultados consistentes e confiáveis. No entanto, o modelo ALOS PALSAR se destaca por sua maior resolução espacial, permitindo uma representação mais detalhada do relevo e maior precisão nas análises. A bacia hidrográfica do rio Xambrê apresenta características típicas de uma bacia alongada, com desenvolvimento moderado da rede de drenagem e menor suscetibilidade a eventos de cheia abrupta. Entretanto, a predominância de solos arenosos e o uso intensivo do solo tornam a região vulnerável a processos erosivos, exigindo atenção quanto às práticas de manejo e conservação.

Dessa forma, o uso de geotecnologias mostrou-se fundamental para o diagnóstico ambiental, fornecendo subsídios importantes para o planejamento territorial e a gestão sustentável dos recursos hídricos. Estudos futuros podem incorporar análises temporais e variáveis climáticas, ampliando a compreensão da dinâmica hidrológica da bacia.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Estadual de Maringá pela concessão da bolsa de iniciação científica 2025-2026.

Referências Bibliográficas.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva: IPCC, 2023.

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 5. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2020.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: Rima, 2007.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, v. 63, p. 1117–1142, 1952.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.

MILLER, V. C. A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. *Project NR 389-042*, Columbia University, Department of Geology, 1953.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, v. 67, p. 597–646, 1956.

ALASKA SATELLITE FACILITY (ASF). *ALOS PALSAR Digital Elevation Model*. Disponível em: https://asf.alaska.edu. Acesso em: 2026.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: https://qgis.org. Acesso em: 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). *CBERS-4A WPM Imagens*. Disponível em: http://www.inpe.br. Acesso em: 2026.

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DO LIDAR TERRESTRE BASEADO EM SLAM NA ESTIMATIVA DO DAP EM AMBIENTE FLORESTAL

1 Marcel Jesus Dias, 2 Érico Fernando Oliveira Martins, 3 Francisco Lledo dos Santos, 4 Henrique Candido de Oliveira, 5 Ricardo Leite Dias, 6 Rodrigo Bruno Zanin

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – IFMT (PPGBB), e-mail: marcel.dias@ifmt.edu.br; 2 Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT (PROFÁGUA), e-mail: profericomartins@unemat.br; 3 Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT (PROFÁGUA), e-mail: franciscolledo@unemat.br; 4 Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP (PPGEC), e-mail: hcandido@unicamp.br; 5 Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT (PROFÁGUA), e-mail: dias.ricardo@unemat.br; 6 Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT (PPGBB/PROFÁGUA), e-mail: rodrigo.zanin@unemat.br

Palavras-chave: LiDAR Terrestre; SLAM; Inventário Florestal.

Resumo

O uso de tecnologias de Localização e Mapeamento Simultâneos (SLAM) com sensor de Detecção e Alcance por Luz (LiDAR) terrestres móveis têm se apresentado como alternativa promissora para levantamentos florestais, especialmente na estimativa de variáveis dendrométricas como o diâmetro à altura do peito (DAP). Este estudo teve como objetivo avaliar a acurácia das estimativas de DAP obtidas por meio de medições em nuvens de pontos advindas de um sistema LiDAR terrestre móvel baseado em SLAM, utilizando o equipamento Foxtech SLAM 100, em um fragmento florestal urbano no município de Sinop, Mato Grosso. Foram selecionadas nove árvores, distribuídas em três classes diamétricas, cujos valores de DAP estimados a partir da nuvem de pontos foram comparados com medições manuais realizadas em campo. A avaliação foi conduzida por meio do erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro percentual absoluto médio (MAPE), além da análise gráfica da relação entre os métodos. Os resultados indicaram concordância entre as estimativas obtidas por LiDAR e as medições manuais, com MAE de 4,22 cm, RMSE de 4,89 cm e MAPE de 15,43%. Observou-se maior variação dos erros em indivíduos com maior complexidade estrutural, possivelmente associada à oclusão, à distribuição irregular dos pontos no fuste e às condições de aquisição dos dados. Conclui-se que o LiDAR terrestre móvel baseado em SLAM apresenta potencial para estimativa de DAP em inventários florestais de baixo custo e melhor flexibilidade de trabalho em relação aos equipamentos do tipo estacionário, especialmente por permitir levantamentos rápidos e não destrutivos. Entretanto, devido ao número reduzido de árvores avaliadas, os resultados devem ser interpretados como uma análise preliminar, sendo recomendada a ampliação da amostragem em estudos futuros.

Introdução

O diâmetro à altura do peito (DAP), normalmente medido a 1,30 m do solo, é uma das variáveis dendrométricas mais importantes em inventários florestais, sendo amplamente utilizado em estimativas de área basal, volume, biomassa, estoque de carbono e estrutura da vegetação (Machado *et al*., 2025; Sun et al., 2025;Wu *et al*., 2024). Tradicionalmente, sua obtenção é realizada por métodos manuais, como fita diamétrica, suta ou fita métrica, os quais apresentam elevada confiabilidade quando corretamente aplicados (Cheng *et al*., 2024). Entretanto, esses métodos demandam tempo, mão de obra especializada e podem apresentar limitações operacionais em áreas extensas, de difícil acesso ou com elevada densidade de vegetação (Gollob; Ritter; Nothdurft, 2020).

Nesse contexto, tecnologias de sensoriamento remoto ativo, especialmente o LiDAR (*Light Detection and Ranging*), têm se consolidado como alternativas para aquisição de informações tridimensionais de ambientes florestais (Guan *et al*., 2024; Teng *et al*., 2023. O LiDAR baseia-se na emissão de pulsos laser e no registro do tempo de retorno do sinal, permitindo estimar distâncias e gerar nuvens de pontos tridimensionais com alta resolução espacial (Wu *et al*., 2024). Em aplicações florestais, essa tecnologia possibilita caracterizar a estrutura vertical e horizontal da vegetação, identificar indivíduos arbóreos e estimar variáveis como altura, DAP, volume de fuste e biomassa acima do solo (Zhou *et al*., 2024; Li *et al*., 2025).

Guan *et al*. (2024) e Teng *et al*. (2023) afirmam que o uso de LiDAR terrestre, também conhecido como TLS (*Terrestrial Laser Scanning*), tem sido amplamente investigado em inventários florestais. E Gollob, Ritter e Nothdurft (2020) e Liu *et al*. (2021) destacam o potencial dessa tecnologia para extração automática de parâmetros dendrométricos, incluindo posição das árvores, DAP e altura do fuste, a partir de nuvens de pontos tridimensionais. Posteriormente, algoritmos baseados em ajuste geométrico, segmentação de fustes, modelos cilíndricos e métodos como RANSAC passaram a ser empregados para melhorar a estimativa automática do DAP e de outros atributos estruturais (Machado *et al*., 2025; Proudman; Ramezani; Fallon, 2021; Wu *et al*., 2024).

Revisões sobre o uso de LiDAR terrestre na área florestal destacam que a tecnologia apresenta elevada capacidade para mensuração não destrutiva da vegetação, embora sua acurácia dependa de fatores como densidade de pontos, número de posições de escaneamento, arquitetura das copas, rugosidade do fuste e grau de oclusão no sub-bosque (Wu *et al*., 2024; Sun *et al*., 2025; Cheng *et al*., 2024). Mokroš *et al*. (2021) conduziram um estudo comparativo de medida de DAP, e ao comparar o TLS com outras tecnologias móveis e fotogramétricas em inventários florestais, o autor confirmou que o TLS fornece os dados mais precisos e confiáveis, alcançando taxas de detecção de indivíduos entre 90,6% e 100%, e o menor erro (RMSE) nas estimativas do DAP.

Embora sistemas TLS estáticos sejam reconhecidos por sua alta precisão, sua aplicação pode ser limitada pelo tempo de instalação, necessidade de múltiplas posições de escaneamento e maior esforço operacional em campo. Como alternativa,

sistemas LiDAR terrestres móveis e portáteis têm ganhado destaque por permitirem levantamentos mais rápidos, com aquisição contínua durante o deslocamento do operador. Esses sistemas geralmente utilizam algoritmos de SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), que permitem estimar simultaneamente a trajetória do sensor e reconstruir o ambiente tridimensional, mesmo em locais com ausência ou limitação de sinal GNSS.

Estudos demonstram o potencial de sistemas móveis baseados em SLAM para inventários florestais. Mokroš *et al*. (2021) ao compararem LiDAR terrestre estático e móvel manual, observaram que sistemas portáteis podem reduzir significativamente o tempo de campo, embora apresentem desafios associados à acurácia posicional e à qualidade da reconstrução dos fustes. De modo semelhante, Gollob, Ritter, Nothdurft (2020) evidenciaram que sistemas de escaneamento a laser associados a SLAM podem gerar informações úteis para inventários, desde que sejam considerados fatores como trajetória de aquisição, fechamento de loops e densidade da nuvem de pontos, e em seus estudos compararam um SLAM móvel com um estático, com o objetivo foi avaliar a diferença na taxa de detecção de árvores, precisão do Diâmetro à Altura do Peito (DAP) e o tempo de coleta de dados, concluindo que o dispositivo móvel foi 4,7 vezes mais rápido e detectou mais árvores devido à redução do efeito de oclusão.

Apesar desses avanços, a aplicação de LiDAR terrestre móvel em ambientes florestais densos ainda apresenta desafios relevantes. A presença de sub-bosque, cipós, arbustos, múltiplos estratos de copa e sobreposição de indivíduos pode dificultar a visada direta ao fuste e reduzir a densidade de pontos na altura de medição do DAP. Além disso, a trajetória de caminhamento, a distância entre sensor e tronco, a velocidade de aquisição e a ocorrência de deriva no algoritmo SLAM podem influenciar a qualidade final da nuvem de pontos (Xie *et al*., 2022; Liu *et al*., 2021;Cheng *et al*., 2024). Assim, estudos de validação local são essenciais para avaliar a confiabilidade dessas tecnologias em diferentes condições florestais.

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a acurácia das estimativas de DAP da nuvem de pontos obtidas por meio de um sistema LiDAR terrestre móvel baseado em SLAM. Esse resultado foi comparado com medições manuais realizadas em uma área de preservação permanente no município de Sinop, Mato Grosso. O foco foi na validação da acurácia para demonstrar que a tecnologia de SLAM pode ter melhor custo e adaptabilidade em relação a equipamentos mais caros, como os estáticos/estacionários.

Material e Métodos

Área de estudo

O estudo foi conduzido em uma reserva urbana de preservação permanente denominada R7, localizada no município de Sinop, estado de Mato Grosso, Brasil. As coordenadas centrais da área correspondem, aproximadamente, a 11°51'04"S e 55°30'58"W, equivalentes a -11,8511° e -55,5161° em graus decimais, obtidas a partir da transformação dos dados geoespaciais originalmente no sistema SIRGAS 2000 para o sistema geográfico WGS 84 (EPSG:4326).

A localização da área de estudo é apresentada na Figura 1, elaborada a partir de bases cartográficas de contexto, com o objetivo de permitir a representação espacial e a visualização multiescalar (Brasil, estado de Mato Grosso, município de Sinop e área da reserva). Os dados geoespaciais foram originalmente processados no sistema de coordenadas projetadas SIRGAS 2000 / UTM zona 21S (EPSG:31981), com unidades em metros, sistema amplamente utilizado em levantamentos topográficos e aplicações geoespaciais no Brasil.

A área analisada corresponde a uma subárea de aproximadamente 7,66 hectares, inserida em um fragmento florestal urbano com área total estimada em cerca de 45 hectares (Figura 1). O fragmento apresenta características de vegetação secundária em estágio intermediário de regeneração, situado em uma região de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado. A estrutura da vegetação é marcada por elevada densidade arbórea, presença de sub-bosque desenvolvido, ocorrência de cipós e significativa sobreposição de copas, resultando em alta complexidade estrutural vertical e horizontal.

Essas características tornam a área particularmente relevante para a avaliação de sensores LiDAR terrestres móveis, uma vez que ambientes com elevada densidade de vegetação e múltiplos estratos estruturais tendem a apresentar maior ocorrência de oclusões, limitação da visada dos fustes e variações na densidade de pontos da nuvem tridimensional, influenciando diretamente a qualidade das estimativas dendrométricas.

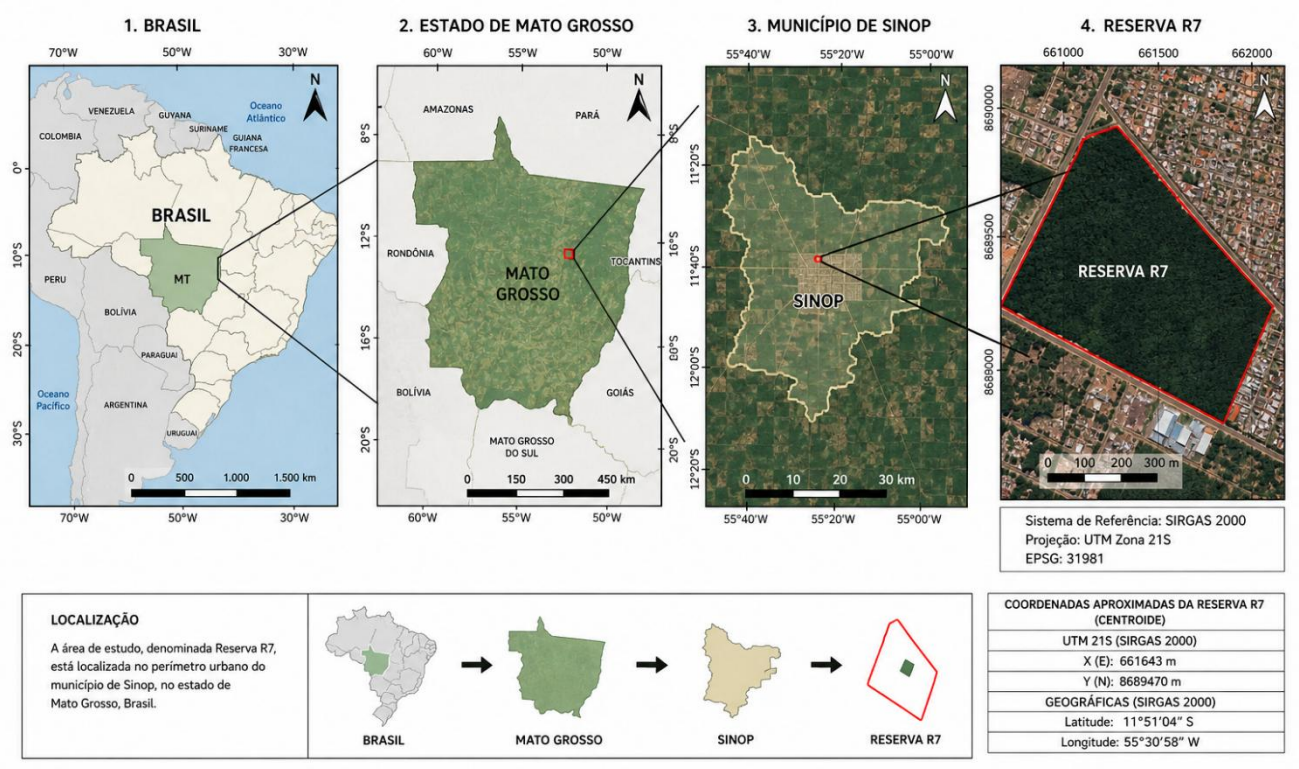


Figura 1: Localização da área de estudo em diferentes escalas espaciais.
Fonte: Elaborado pelo autor com base em imagens do Google Earth, acesso em 2026.

Aquisição da nuvem de pontos com SLAM

A aquisição dos dados foi realizada por meio de um sistema LiDAR terrestre móvel baseado em tecnologia SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), utilizando o equipamento Foxtech SLAM 100 (Figura 2). O levantamento foi conduzido por caminhamento contínuo no interior da área de estudo, buscando-se contornar os indivíduos arbóreos e registrar os fustes a partir de múltiplos ângulos de visada. Essa estratégia teve como objetivo reduzir os efeitos de oclusão e melhorar a qualidade da reconstrução tridimensional dos troncos.

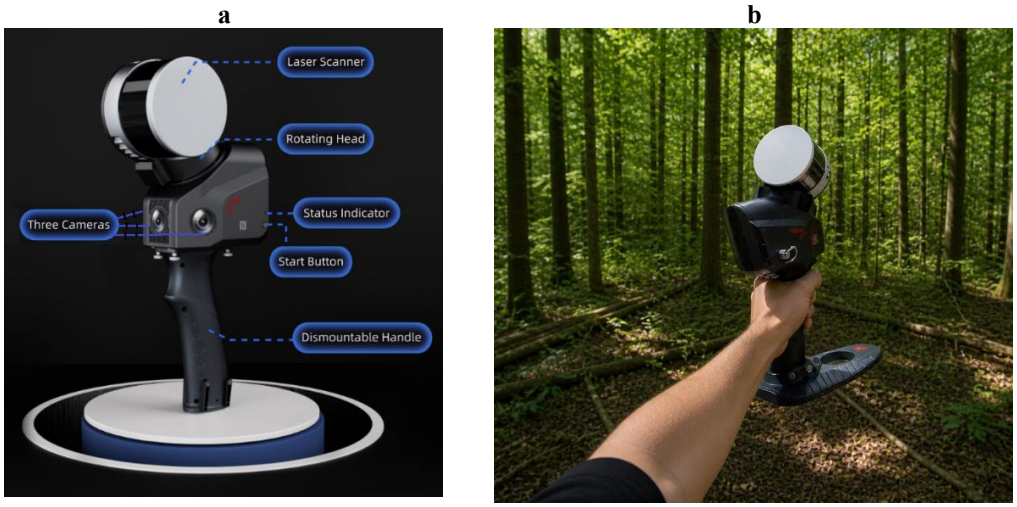


Figura 2: Foxtech SLAM 100. (a) Apresentação do equipamento. (b) Visão de uso do Scanner.
Fonte: Adaptado de Feima Robotics. Disponível em: https://www.feimarobotics.com. Acesso em: 27 abr. 2026.

O equipamento utilizado consiste em um scanner portátil com cabeça rotativa de 360° e cobertura de nuvem de pontos de 270° x 360°, alcance de até 120 metros, taxa de aquisição de aproximadamente 320.000 pontos por segundo e taxa de frequência entre 5 e 20 Hz, possibilitando a geração de nuvens de pontos tridimensionais de alta densidade. O sistema integra sensores ópticos e algoritmos de SLAM, permitindo a aquisição de dados em ambientes sem cobertura GNSS e a geração de nuvens de pontos colorizadas para apoio à interpretação visual. E ao final do processamento, foram identificados aproximadamente 885 indivíduos arbóreos na nuvem de pontos resultante.

Processamento da nuvem de pontos

O processamento inicial dos dados LiDAR foi realizado no software PCA (*Point Cloud Analyst)*, utilizando os módulos PCA *View* e PCA *Toolbox*, com o objetivo de preparar a nuvem de pontos para extração de métricas dendrométricas. E inicialmente, no módulo PCA *View*, foi realizado o recorte da área de interesse, isolando-se a região correspondente ao fragmento florestal analisado (Figura 3a). Essa etapa permitiu reduzir o volume de dados e direcionar o processamento aos indivíduos arbóreos da área selecionada.

Na sequência, no módulo PCA *Toolbox*, foram aplicados algoritmos de detecção e segmentação de árvores individuais, baseados em características geométricas e na distribuição espacial da nuvem de pontos. Esse procedimento permitiu separar os indivíduos arbóreos e reconstruir suas estruturas tridimensionais (Figura 3), com destaque para tronco e copa. E a partir das árvores segmentadas, foram extraídas métricas dendrométricas, incluindo o DAP, estimado a partir da geometria do tronco na altura padrão de 1,30 m em relação ao solo.

A qualidade das estimativas de DAP está diretamente associada à densidade, distribuição e uniformidade dos pontos na região do fuste, podendo ser afetada por fatores como oclusão, presença de sub-bosque, sobreposição de copas e complexidade estrutural da vegetação.

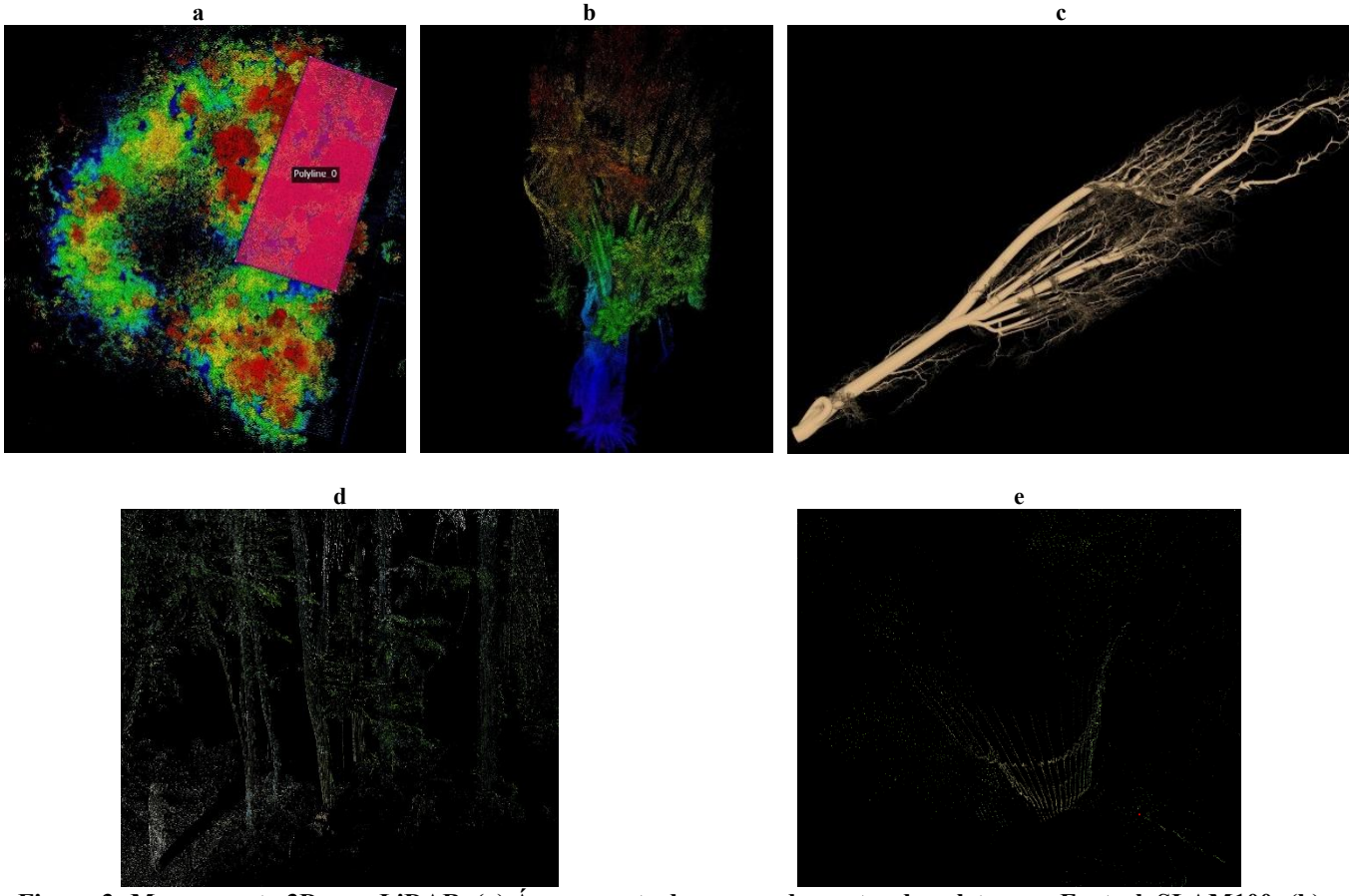


Figura 3: Mapeamento 3D com LiDAR. (a) Área recorte da nuvem de pontos da coleta com Foxtech SLAM100; (b) Árvore 3D resultante da nuvem de pontos; (b) Estrutura 3D do tronco e galhos. (d) nuvem de pontos frontal de árvores. (e) recorte transversal de uma árvore.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Seleção das árvores para validação

A seleção das árvores utilizadas na validação foi realizada a partir dos dados georreferenciados derivados da nuvem de pontos LiDAR. Os indivíduos foram classificados em três classes diamétricas: pequeno, médio e grande porte, com base nos valores de DAP estimados pelo LiDAR. Para garantir representatividade amostral e reduzir a dependência espacial entre indivíduos, foi desenvolvido um procedimento automatizado em linguagem R para seleção das árvores.

O algoritmo realizou amostragem aleatória dentro de cada classe diamétrica, utilizando uma semente fixa para assegurar a reprodutibilidade do processo. A seleção considerou uma distância entre 10 e 20 metros entre indivíduos. Esse procedimento teve como objetivo evitar a seleção de árvores excessivamente agrupadas, reduzir possíveis efeitos de autocorrelação espacial e facilitar a localização dos indivíduos em campo. E em seguida, foram selecionadas nove árvores, sendo três por classe diamétrica. As coordenadas desses indivíduos foram exportadas para ambiente SIG e para o aplicativo *QField*, permitindo sua localização durante a etapa de validação em campo.

Validação de campo

A validação dos dados foi realizada por meio da medição manual da circunferência à altura do peito CAP das árvores selecionadas, utilizando fita métrica comum. As medições foram realizadas a 1,30 m do solo. Posteriormente, os valores de CAP foram convertidos para diâmetro à altura do peito DAP pela relação DAP = CAP / π, considerando π ≈ 3,1416. Os valores de DAP obtidos a partir das medições manuais foram utilizados como referência para avaliação da acurácia das estimativas derivadas do LiDAR terrestre.

Análise estatística

A análise dos dados foi conduzida no ambiente R, avaliando-se a relação entre os valores de DAP estimados pelo LiDAR e aqueles obtidos por medição manual em campo. E neste foram calculadas as seguintes métricas de erro: erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro percentual absoluto médio (MAPE).

Adicionalmente, foram elaborados gráficos (Figura 4) para avaliar a relação entre DAP estimado pelo LiDAR e DAP medido manualmente, o erro absoluto em função do diâmetro da copa e a distribuição do erro percentual por indivíduo. E essas análises permitiram avaliar o desempenho geral do método e investigar possíveis efeitos da estrutura da vegetação sobre a precisão das estimativas de DAP.

Resultados e Discussão

A comparação entre os valores de DAP estimados na nuvem de pontos e aqueles obtidos por medição manual indicou relação positiva entre os métodos. A proximidade dos pontos em relação à linha 1:1 (Figura 4a) sugere concordância entre as estimativas, embora tenha sido observada dispersão em alguns indivíduos, especialmente naqueles de maior porte ou com maior complexidade estrutural.

Os indicadores quantitativos obtidos foram MAE de aproximadamente 4,22 cm, RMSE de 4,89 cm e MAPE de 15,43%. Esses valores indicam que, em média, as estimativas de DAP derivadas do LiDAR apresentaram erro absoluto da ordem de 4 a 5 cm em relação às medições manuais. Considerando a complexidade estrutural do fragmento florestal analisado e a natureza móvel do sistema de aquisição, os resultados demonstram potencial de aplicação da tecnologia em levantamentos florestais rápidos e não destrutivos.

A análise da correlação entre o diâmetro da copa e o erro absoluto (Figura 4b) indica que indivíduos com complexidade estrutural mais elevada podem demonstrar uma maior variação nas estimativas de DAP. Esse comportamento pode estar relacionado com uma maior frequência de oclusões, a presença de sub-bosque, a sobreposição de copas e a diminuição da densidade de pontos na área do tronco. Esses fatores limitam a reconstrução apropriada da seção transversal do fuste na altura de 1,30 m, impactando diretamente a avaliação do DAP. Os estudos de Li *et al*. (2025), Xie *et al*. (2022) e Gollob, Ritter e Nothdurft (2020) que a precisão pode ser afetada pela configuração da trajetória, pela densidade dos pontos e pela obstrução dos troncos.

A distribuição do erro percentual por indivíduo (Figura 4c) mostrou que a maioria das estimativas apresentou erro inferior a 20%, com alguns indivíduos abaixo de 10%. Entretanto, a ocorrência de erros mais elevados em árvores específicas evidencia que fatores locais, como irregularidade do fuste, inclinação do tronco, presença de cipós, oclusão parcial e possíveis limitações do ajuste geométrico, podem afetar a estimativa automática do DAP.

Em comparação com sistemas TLS estáticos, que geralmente apresentam maior estabilidade geométrica e maior controle sobre a aquisição, sistemas móveis baseados em SLAM oferecem como principal vantagem a rapidez operacional. No entanto, estão mais sujeitos a erros associados à trajetória, à deriva do algoritmo SLAM e à variação da densidade de pontos ao longo do caminhamento. Assim, a adoção dessa tecnologia em inventários florestais deve considerar o equilíbrio entre ganho operacional e nível de acurácia requerido para cada aplicação.

De modo geral, os resultados obtidos reforçam o potencial do LiDAR terrestre móvel baseado em SLAM para estimativa de DAP em ambientes florestais. No entanto, devido ao número reduzido de indivíduos avaliados, os resultados devem ser interpretados como uma avaliação preliminar. Estudos futuros com maior número de árvores, diferentes classes diamétricas, espécies e condições estruturais são necessários para consolidar a aplicabilidade do método.

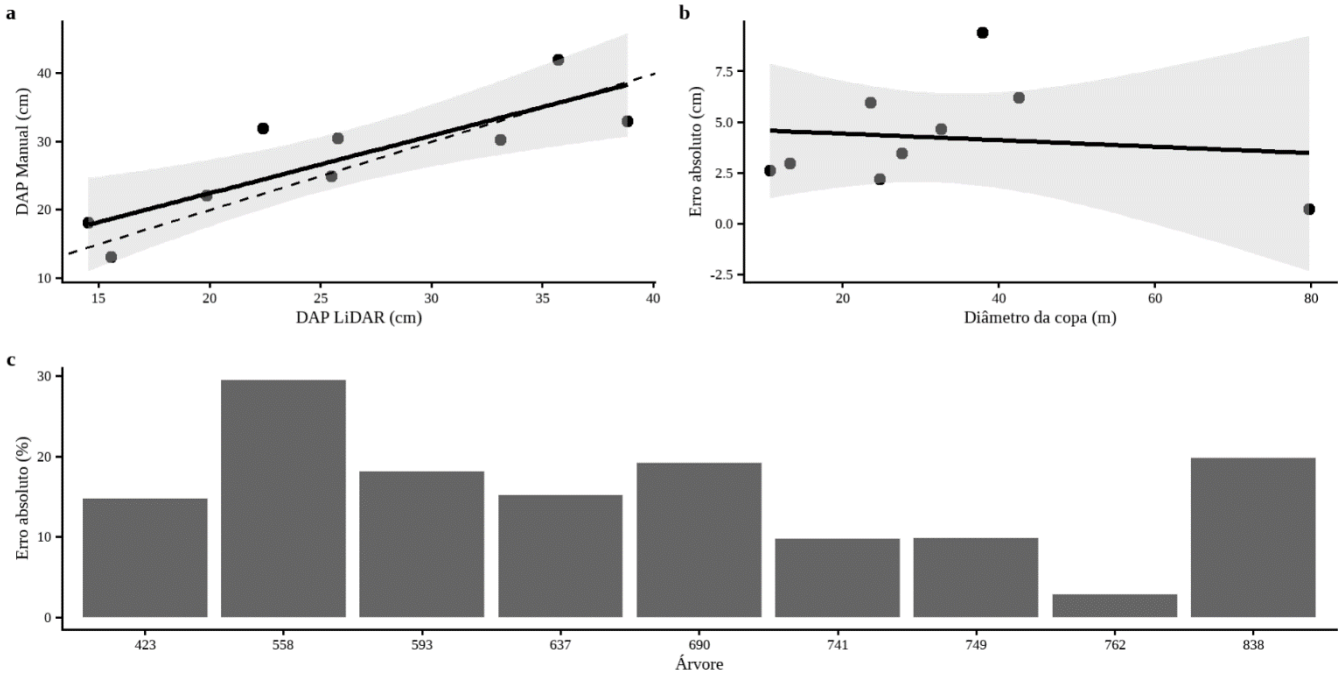


Figura 4: Avaliação da estimativa de DAP por LiDAR terrestre. (a) Relação entre DAP LiDAR e DAP manual; (b) Relação entre diâmetro da copa e erro absoluto; (c) Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) por árvore. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Considerações finais

O sistema LiDAR terrestre móvel baseado em SLAM apresentou desempenho satisfatório na estimativa do DAP em ambiente florestal, com boa correspondência em relação às medições manuais realizadas em campo, tendo como erros obtidos MAE de 4,22 cm, RMSE de 4,89 cm e MAPE de 15,43% indicam que a tecnologia apresenta potencial para aplicação em inventários florestais, especialmente em situações que demandam rapidez na coleta de dados e métodos não destrutivos de mensuração.

Entretanto, a acurácia das estimativas mostrou-se sensível à complexidade estrutural da vegetação, principalmente em função de oclusões, sub-bosque denso, sobreposição de copas e distribuição irregular dos pontos no fuste. Além disso, a amostra reduzida de árvores avaliadas limita a generalização dos resultados, e como isso recomenda-se, para estudos futuros, ampliar o número de indivíduos avaliados, incluir diferentes espécies e classes diamétricas, testar diferentes estratégias de caminhamento e comparar os resultados com dados obtidos por LiDAR terrestre estático e/ou LiDAR aéreo. Essas abordagens podem contribuir para aumentar a robustez das estimativas e consolidar o uso de sistemas LiDAR móveis baseados em SLAM em inventários florestais.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) por meio do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2023. Agradecemos ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), pelo apoio técnico-científico aportado até o momento. Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT), à Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), ao Laboratório de Informação Espacial (SPINLAB) e ao Laboratório de Análise de Imagens Digitais (LAID) pelo apoio recebido. Além disso, agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT), por meio de bolsa concedida no âmbito do Edital n.º 010/2025 - Doutorado com produto tecnológico, processo FAPEMAT-PRO.0002044/2025.

Referências Bibliográficas

CHENG, Penggen *et al.* Evaluation of Accuracy in Estimating Diameter at Breast Height Based on the Scanning Conditions of Terrestrial Laser Scanning and Circular Fitting Algorithm. **Forests 2024, Vol. 15, Page 313**, v. 15, n. 2, p. 313, 7 fev. 2024.

GOLLOB, Christoph; RITTER, Tim; NOTHDURFT, Arne. Forest Inventory with Long Range and High-Speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Technology. **Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 1509**, v. 12, n. 9, p. 1509, 9 maio 2020.

GUAN, T. ;. *et al.* Advancing Forest Plot Surveys: A Comparative Study of Visual vs. LiDAR SLAM Technologies. **Forests 2024, Vol. 15, Page 2083**, v. 15, n. 12, p. 2083, 26 nov. 2024.

LI, Longwei *et al.* Impact of Backpack LiDAR Scan Routes on Diameter at Breast Height Estimation in Forests. **Forests 2025, Vol. 16, Page 527**, v. 16, n. 3, p. 527, 16 mar. 2025.

LIU, Lulu *et al.* Single Tree Segmentation and Diameter at Breast Height Estimation with Mobile LiDAR. **IEEE Access**, v. 9, p. 24314–24325, 2021.

MACHADO, Milena Duarte *et al.* Estimating Position, Diameter at Breast Height, and Total Height of Eucalyptus Trees Using Portable Laser Scanning. **Remote Sensing 2025, Vol. 17, Page 2904**, v. 17, n. 16, p. 2904, 20 ago. 2025.

MOKROŠ, Martin *et al.* Novel low-cost mobile mapping systems for forest inventories as terrestrial laser scanning alternatives. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 104, p. 102512, 15 dez. 2021.

PROUDMAN, Alexander; RAMEZANI, Milad; FALLON, Maurice. Online estimation of diameter at breast height (DBH) of forest trees using a handheld lidar. **2021 10th European Conference on Mobile Robots, ECMR 2021 - Proceedings**, 1 ago. 2021.

SUN, Angxi *et al.* Individual Trunk Segmentation and Diameter at Breast Height Estimation Using Mobile LiDAR Scanning. **Forests 2025, Vol. 16, Page 582**, v. 16, n. 4, p. 582, 27 mar. 2025.

TENG, Poching *et al.* Accuracy Evaluation and Branch Detection Method of 3D Modeling Using Backpack 3D Lidar SLAM and UAV-SfM for Peach Trees during the Pruning Period in Winter. **Remote Sensing 2023, Vol. 15, Page 408**, v. 15, n. 2, p. 408, 9 jan. 2023.

WU, Yang *et al.* Estimation of Diameter at Breast Height in Tropical Forests Based on Terrestrial Laser Scanning and Shape Diameter Function. **Sustainability 2024, Vol. 16, Page 2275**, v. 16, n. 6, p. 2275, 8 mar. 2024.

XIE, Yuyang *et al.* Applying a Portable Backpack Lidar to Measure and Locate Trees in a Nature Forest Plot: Accuracy and Error Analyses. **Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 1806**, v. 14, n. 8, p. 1806, 8 abr. 2022.

ZHOU, Tian *et al.* Forest feature LiDAR SLAM (F2-LSLAM) for backpack systems. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 212, p. 96–121, 1 jun. 2024.

PARÂMETROS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS LIDAR COM RPA EM RESERVAS URBANAS: UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL

1 Marcel Jesus Dias, 2 Rodrigo Bruno Zanin, 3 Henrique Candido de Oliveira, 4 Francisco Lledo dos Santos, 5 Julio Cesar Beltrame Benatti, 6 Ricardo Leite Dias, 7 Érico Fernando Oliveira Martins

1Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – IFMT (PPGBB), e-mail: marcel.dias@ifmt.edu.br; 2Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT (PPGBB/PROFÁGUA), e-mail: rodrigo.zanin@unemat.br; 3Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP (PPGEC), e-mail: hcandido@unicamp.br; 4Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT (PROFÁGUA), e-mail: franciscolledo@unemat.br; 5Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT, e-mail: benatti@unemat.br; 6Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT (PROFÁGUA), e-mail: dias.ricardo@unemat.br; 7Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT (PROFÁGUA), e-mail: profericomartins@unemat.br.

Palavras-chave: LiDAR; Modelo Digital de Terreno; Estrutura da vegetação.

Resumo

A aquisição de dados LiDAR (*Light Detection and Ranging*) aerotransportados por RPA (*Remotely Piloted Aircraft*) tem se consolidado como uma alternativa eficiente para o levantamento de informações geoespaciais em ambientes complexos, especialmente em áreas com cobertura vegetal heterogênea, como reservas urbanas. No entanto, a definição de parâmetros operacionais adequados ainda representa um desafio, devido à influência de variáveis como altitude de voo, sobreposição entre faixas, tipo de retorno do sensor e taxa de amostragem na qualidade dos produtos gerados. Este trabalho apresenta uma análise experimental de diferentes cenários de aquisição de dados LiDAR com RPA, com o objetivo de avaliar o impacto desses parâmetros na qualidade dos dados, com ênfase na geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) e na caracterização da estrutura da vegetação. Foram realizados voos com diferentes configurações operacionais, posteriormente organizadas em grupos conforme seu desempenho em aplicações específicas. A avaliação foi baseada em métricas de erro, incluindo RMSE e NMAD, além de análise qualitativa da distribuição dos retornos. Os resultados indicam que cenários com maior redundância espacial e uso de múltiplos retornos apresentam melhor desempenho na representação do terreno sob cobertura vegetal. Observou-se, entretanto, que o desempenho não segue relação linear com os parâmetros operacionais, sendo identificado que configurações intermediárias podem alcançar melhores resultados, como evidenciado pelo menor RMSE observado no cenário A80-O70/70-Tri. Para a caracterização da vegetação, cenários com menor altitude e múltiplos retornos demonstraram maior capacidade de representação dos estratos verticais. Conclui-se que a definição dos parâmetros de aquisição deve considerar o objetivo da aplicação, sendo necessário estabelecer estratégias específicas para a geração de MDT e para a análise da estrutura da vegetação em reservas urbanas.

Introdução

As reservas urbanas representam ambientes de elevada complexidade espacial, caracterizados pela coexistência de elementos naturais e antrópicos, além de significativa variabilidade na cobertura vegetal e na morfologia do terreno. Essas características impõem desafios relevantes à aquisição de dados geoespaciais de alta resolução, fundamentais para o suporte a análises ambientais, planejamento territorial e monitoramento de processos naturais.

Tradicionalmente, a coleta de dados geoespaciais em áreas com cobertura vegetal tem sido realizada por meio de técnicas fotogramétricas baseadas em sensores ópticos. Embora amplamente difundidas e operacionalmente acessíveis, essas técnicas apresentam limitações importantes em ambientes com vegetação densa, uma vez que registram predominantemente a superfície visível, dificultando a obtenção de informações sobre o terreno e sobre os estratos inferiores da vegetação (Wallace et al., 2016). Essa limitação compromete a geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) acurados e a adequada caracterização da estrutura vertical da vegetação, especialmente em ambientes heterogêneos.

Nesse contexto, o uso de sensores LiDAR (*Light Detection and Ranging*) embarcados em Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) tem ampliado significativamente as possibilidades de levantamento em áreas de difícil acesso, permitindo a obtenção de informações tridimensionais detalhadas, mesmo sob cobertura vegetal. A capacidade do LiDAR de registrar múltiplos retornos ao longo da trajetória do pulso laser possibilita a identificação tanto da superfície do terreno quanto da estrutura vertical da vegetação, incluindo dossel e sub-bosque, tornando essa tecnologia particularmente adequada para estudos ambientais (Hyyppä et al., 2012).

Nos últimos anos, a evolução dos sistemas LiDAR embarcados em RPA tem sido marcada pela disponibilização de sensores integrados, capazes de combinar unidades de varredura laser, sistemas inerciais (IMU), câmeras RGB e posicionamento GNSS em um único equipamento. Essa integração tem reduzido a complexidade operacional e ampliado o acesso a levantamentos tridimensionais de alta precisão, contribuindo para a difusão dessa tecnologia em aplicações ambientais e geoespaciais. Nesse cenário, plataformas comerciais têm possibilitado a realização de levantamentos com maior padronização e reprodutibilidade, favorecendo estudos experimentais voltados à avaliação de parâmetros de aquisição.

Apesar desses avanços, a qualidade dos produtos derivados de levantamentos LiDAR não depende exclusivamente da densidade de pontos, mas da interação entre parâmetros operacionais como altitude de voo, sobreposição entre faixas, padrão de

varredura, tipo de retorno do sensor e taxa de amostragem. Estudos como o de Jakubowski et al. (2013) demonstram que a distribuição espacial dos pulsos influencia diretamente a capacidade de representação do terreno e da vegetação. Em plataformas RPA, essa relação torna-se ainda mais sensível, uma vez que variações nos parâmetros de voo impactam simultaneamente a densidade, o ângulo de incidência e a penetração no dossel (Brede et al., 2019). Mais recentemente, estudos têm evidenciado que a definição desses parâmetros envolve *trade-offs* complexos entre qualidade geométrica, detalhamento estrutural e eficiência operacional, especialmente em ambientes com vegetação heterogênea (HYYPPÄ et al., 2012; JAKUBOWSKI et al., 2013; WULDER et al., 2012).

Apesar do avanço da literatura, ainda há uma lacuna no que se refere à avaliação experimental integrada dos parâmetros operacionais de aquisição em sistemas LiDAR embarcados em RPA, particularmente em ambientes urbanos com vegetação heterogênea. Grande parte dos estudos concentra-se em análises isoladas de variáveis ou em contextos florestais mais homogêneos, havendo menor disponibilidade de investigações que considerem a interação entre múltiplos parâmetros em condições reais de operação.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar experimentalmente diferentes configurações de aquisição de dados LiDAR com RPA, avaliando a influência integrada dos parâmetros operacionais na qualidade dos dados em ambientes de reservas urbanas, com ênfase na geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) e na caracterização da estrutura da vegetação.

Material e Métodos

Nos últimos anos, a evolução dos sensores LiDAR embarcados em Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) tem contribuído significativamente para a ampliação do uso dessa tecnologia em aplicações ambientais e geoespaciais. A disponibilização de sistemas integrados, capazes de combinar sensores LiDAR, unidades inerciais (IMU), câmeras RGB e posicionamento GNSS em um único equipamento, tem reduzido a complexidade operacional e ampliado o acesso a levantamentos tridimensionais de alta precisão. Nesse contexto, o sensor *DJI Zenmuse L1* destaca-se como uma das primeiras soluções amplamente difundidas no mercado com arquitetura integrada voltada a plataformas RPA comerciais, contribuindo para a consolidação do LiDAR aerotransportado como ferramenta acessível para estudos aplicados.

Nesta pesquisa, as nuvens de pontos LiDAR foram gerada pelo sensor *DJI Zenmuse L1* (Figura 1b), embarcado em um RPA *DJI Matrice 300 RTK* (Figura 1a). O sensor L1 integra um scanner a laser *Livox*, uma câmera RGB auxiliar e uma IMU de alta precisão, permitindo a geração de nuvens de pontos colorizadas, enriquecendo a interpretação visual das feições mapeadas. Este sensor possui uma taxa de varredura de até 240.000 pontos por segundo, podendo registrar até três retornos. A sincronização nativa com o sistema RTK do Matrice 300 assegura alta acurácia posicional.

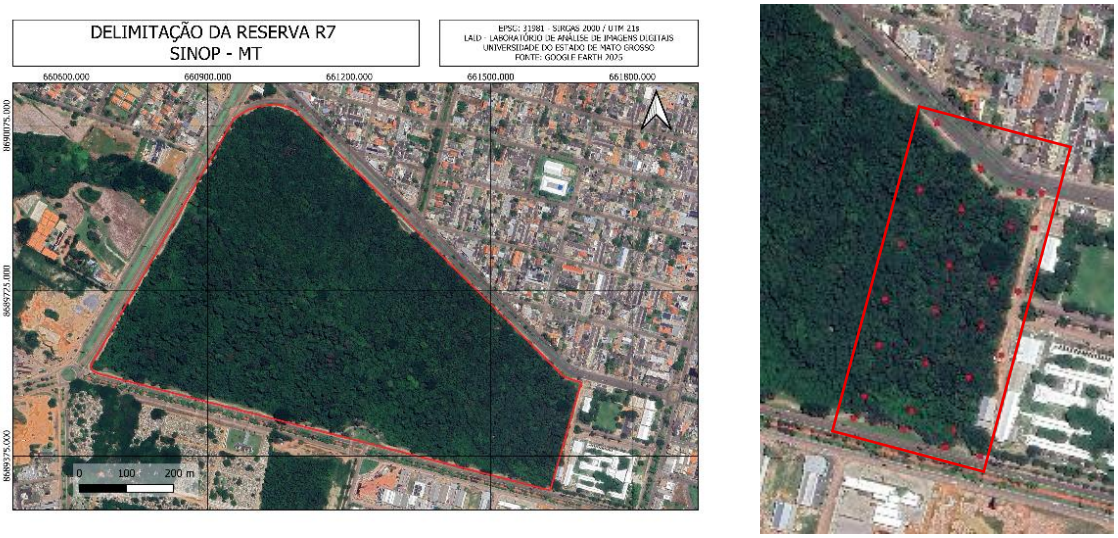


(a) **(b)**

Figura 1 – RPA (a) *DJI Matrice 300 RTK* e (b) *DJI ZenMuse L1*.
Fonte: https://enterprise.dji.com

A área de experimento corresponde a uma porção de aproximadamente 3 hectares da Reserva R7 (Figura 2) que tem área total de 45 hectares. A R7 é uma unidade de conservação urbana localizada no município de Sinop, na região norte do estado de Mato Grosso, constituindo um fragmento florestal representativo das condições ambientais da região de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado, caracterizado por elevada heterogeneidade estrutural da vegetação e significativa diversidade de espécies.

A área apresenta cobertura vegetal predominantemente arbórea, com presença de dossel fechado em determinados trechos e ocorrência de sub-bosque, o que resulta em uma estrutura vertical composta por múltiplos estratos. Do ponto de vista geomorfológico, a área apresenta relevo suavemente ondulado, com variações altimétricas moderadas. O clima da região é do tipo tropical úmido, com estação chuvosa bem definida e precipitação anual elevada, fatores que favorecem o desenvolvimento da cobertura vegetal densa e contínua. Nesse sentido, a área configura-se como um ambiente representativo para a análise de diferentes estratégias de aquisição de dados LiDAR, permitindo avaliar o desempenho de parâmetros operacionais em condições reais.



(a) (b)

Figura 2 – Apresentação da (a) Reserva R7, (b) com destaque para a área de estudo e rede de pontos de checagem.
Fonte: Elaboração própria (2026)

Para essa área de experimentação, foram definidos múltiplos cenários de aquisição com o *Zenmuse L1*, com variação controlada dos parâmetros operacionais, com o objetivo de avaliar sua influência na qualidade dos dados LiDAR. Estes cenários procuram indicar configurações potencialmente eficientes voltadas à geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) de alta qualidade e à caracterização da estrutura da vegetação, procurando equilibrar isso com a eficiência operacional (economia de bateria, por exemplo). Os parâmetros variados nestes cenários incluem altitude de voo, sobreposição lateral (*side overlap*), sobreposição longitudinal (*forward overlap*), tipo de retorno do sensor (eco), taxa de amostragem e densidade de pontos por metro quadrado.

Com base nesses parâmetros, foram definidos os cenários experimentais apresentados na Tabela 1, com o objetivo de identificar padrões de desempenho que permitam o agrupamento das configurações com base nos resultados obtidos. Os parâmetros de velocidade, GSD e duração são apresentados como variáveis derivadas do planejamento de voo, não tendo sido definidos diretamente pelo usuário.

CENÁRIO	ALTITUDE	SIDE OVERLAP	FORWARD OVERLAP	ECO	TAXA DE AMOSTRAGEM	PONTOS M²
A70-O70/70-Tri	70 m	70%	70%	Triple Echo	160 kHz	499
A70-O70/70-Tri-X	70 m	70%	70%	Triple Echo	160 kHz	499
A80-O70/70-Dual	80 m	70%	70%	Dual Echo	240 kHz	654
A70-O70/70-Dual	70 m	70%	70%	Dual Echo	240 kHz	748
A80-O70/80-Tri	80 m	70%	80%	Triple Echo	160 kHz	436
A60-O70/70-Tri	60 m	70%	70%	Triple Echo	160 kHz	680
A80-O70/70-Tri	80 m	70%	70%	Triple Echo	160 kHz	436
A70-O80/80-Tri	70 m	80%	80%	Triple Echo	160 kHz	1003
A80-O80/80-Tri	80 m	80%	80%	Triple Echo	160 kHz	877

Tabela 1 – Configurações de aquisição dos cenários experimentais.
Fonte: Elaboração própria (2026)

Vale destacar que o cenário A70-O70/70-Tri-X corresponde a uma estratégia de aquisição em malha cruzada, obtida a partir da repetição do plano de voo do cenário A70-O70/70-Tri com a inclusão de uma segunda passagem orientada a 90° em relação à direção original. Essa configuração aumenta a redundância espacial e a interseção angular entre as faixas de varredura, contribuindo para a redução de oclusões e para a melhoria da consistência geométrica da nuvem de pontos. Como consequência, espera-se maior robustez na representação do terreno e melhor qualidade nos Modelos Digitais de Terreno (MDT), especialmente em áreas com cobertura vegetal heterogênea, onde a geometria de aquisição desempenha papel crítico na detecção do solo.

Os cenários de aquisição apresentados foram operacionalizados no aplicativo *DJI Pilot*, ambiente de planejamento e execução de missões automatizadas para plataformas RPA da marca *DJI*. Nesse aplicativo, os parâmetros definidos nos cenários foram inseridos diretamente na interface de planejamento, permitindo a geração das rotas de voo correspondentes a cada cenário. A utilização desse ambiente garantiu a padronização das missões e o controle das variáveis operacionais durante a aquisição dos dados, assegurando a reprodutibilidade dos experimentos. O processamento inicial dos dados LiDAR, incluindo

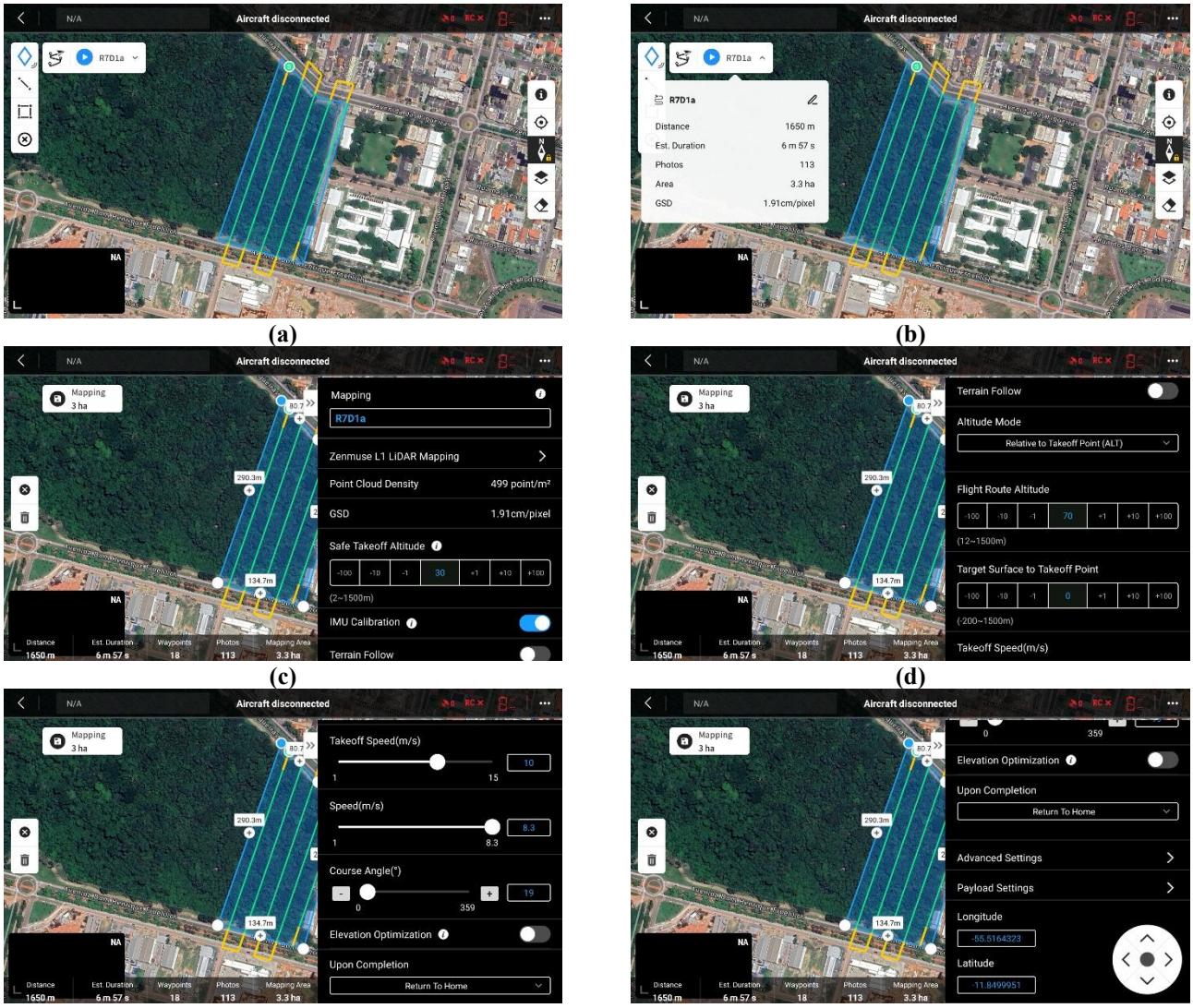
georreferenciamento e geração da nuvem de pontos, foi realizado no software DJI Terra. As etapas de análise geométrica, comparação entre superfícies e cálculo de métricas de erro foram conduzidas no software CloudCompare.

A avaliação das nuvens de pontos geradas em cada cenário foi conduzida por meio de análises qualitativas e quantitativas. A análise qualitativa baseou-se na inspeção visual dos dados, com o objetivo de identificar a representação das estruturas da vegetação, tais como troncos, galhos, dossel e sub-bosque. Já a avaliação quantitativa foi realizada a partir da discrepância entre as coordenadas altimétricas dos pontos de checagem e a superfície gerada pelo Modelo Digital de Terreno (MDT) derivado dos dados LiDAR. Os pontos de checagem foram obtidos por meio de levantamento GNSS em modo RTK (Real-Time Kinematic), com estação base definida por solução PPP-IBGE (Posicionamento por Ponto Preciso), garantindo precisão centimétrica nas coordenadas de referência. A medição das discrepâncias se deu pelo método ponto-superfície (*point-to-surface*) disponível no software CloudCompare. A partir das diferenças obtidas, foram calculadas métricas estatísticas de erro, incluindo o erro quadrático médio (RMSE), o erro absoluto mediano normalizado (NMAD) e o desvio padrão, permitindo a análise comparativa do desempenho dos diferentes cenários de aquisição.

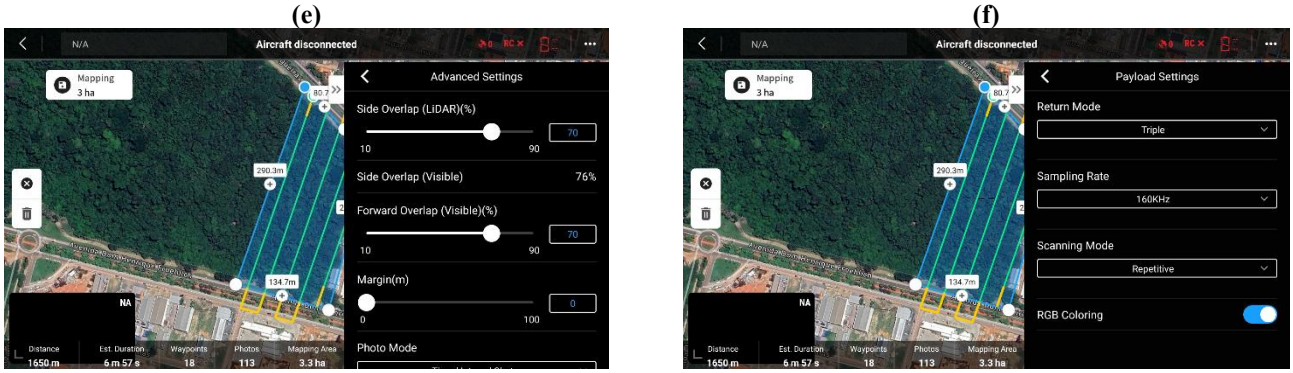
Resultados e Discussão

A aquisição dos dados referentes aos cenários experimentais descritos na seção anterior foi realizada em um único dia, sob condições atmosféricas semelhantes, com o objetivo de minimizar a influência de variáveis externas nos resultados. Essa estratégia buscou garantir maior consistência na comparação entre os cenários, reduzindo possíveis efeitos associados a variações de umidade, condições da vegetação e estabilidade atmosférica, que podem influenciar a resposta do sinal LiDAR e a qualidade da nuvem de pontos. Dessa forma, as diferenças observadas entre os cenários podem ser atribuídas predominantemente às variações nos parâmetros operacionais adotados.

As configurações apresentadas na Figura 3 ilustram a transcrição dos parâmetros de um cenário para o ambiente do *DJI Pilot*, que é o controle de voo utilizado para a operação do sensor e RPA. A utilização do *DJI Pilot* permitiu a padronização das condições de coleta entre os diferentes cenários testados, garantindo maior controle sobre as variáveis operacionais e reprodutibilidade das missões, aspectos fundamentais para a análise comparativa do desempenho.



(e) (f)



(g) (h)

Figura 3 – Telas do *DJI Pilot* ilustrando a configuração do cenário A70-O70/70-Tri: (a) definição da área de voo; (b) planejamento das rotas; (c) parâmetros de altitude e sobreposição; (d) configuração do sensor LiDAR; (e) parâmetros de velocidade e duração estimada; (f) ajustes de aquisição; (g) sobreposição; e (h) resumo das configurações operacionais. Fonte: Elaboração própria (2026)

A organização dos cenários em grupos foi definida a partir da análise integrada dos parâmetros operacionais e dos resultados obtidos, considerando o desempenho relativo de cada configuração em diferentes aplicações. Essa classificação não foi estabelecida a priori, mas construída com base na interpretação dos dados, levando em conta a capacidade dos cenários em atender a objetivos específicos, como a geração de Modelos Digitais de Terreno de alta resolução e a caracterização da estrutura da vegetação. Dessa forma, os grupos representam categorias analíticas que sintetizam padrões de comportamento observados nos dados, permitindo uma análise comparativa mais estruturada entre diferentes estratégias de aquisição. Embora os grupos pudessem ter sido definidos com base no potencial teórico das configurações, os resultados evidenciam que o desempenho efetivo pode variar em função da interação entre os parâmetros operacionais. Essa abordagem permite distinguir entre desempenho esperado e desempenho observado, evidenciando a complexidade das interações entre os parâmetros de aquisição.

Os cenários apresentados podem possuir aplicabilidade em mais de um grupo, em função de suas características operacionais e do potencial de uso em diferentes tipos de análise. Nesses casos, são identificados por meio de um asterisco (*), indicando que a mesma configuração pode ser empregada tanto na geração de Modelos Digitais de Terreno quanto na caracterização da estrutura da vegetação.

Os cenários classificados como Grupo A (Tabela 2) correspondem às configurações com maior potencial para a geração de MDT de altíssima qualidade, sendo considerados como referência ou condição de maior potencial teórico para geração de MDT de alta qualidade. Essas configurações são caracterizadas por elevada redundância espacial, resultante da combinação de altos valores de sobreposição e menor velocidade de voo, associada ao uso de múltiplos retornos do tipo *triple*, o que maximiza a probabilidade de detecção do terreno sob cobertura vegetal e reduz a ocorrência de vazios na nuvem de pontos. Nesse contexto, destacam-se também estratégias adicionais de aquisição, como malhas cruzadas, que contribuem para maior robustez geométrica e consistência entre faixas de voo.

Cenário	Altitude	Side Overlap	Forward Overlap	Velocidade	Eco	Taxa	Pontos/m²	GSD	Duração
A70-O80/80-Tri	70 m	80%	80%	5,5 m/s	Triple	160 kHz	1003	1,91	00:11:40
A70-O70/70-Tri-X	70 m	70%	70%	8,3 m/s	Triple	160 kHz	499	1,91	00:10:12

Tabela 2 – Grupo A: cenários com melhor desempenho para geração de MDT.
Fonte: Elaboração própria (2026)

O Grupo B (Tabela 3) reúne cenários com alto potencial para geração de MDT de qualidade elevada, sendo considerados candidatos a configurações padrão para aplicações em reservas urbanas, embora alguns desses cenários possam apresentar limitações na caracterização detalhada da estrutura da vegetação. Essas configurações apresentam equilíbrio entre qualidade dos dados e eficiência operacional, mantendo o uso de múltiplos retornos e níveis adequados de sobreposição, porém com parâmetros que permitem maior cobertura de área em menor tempo quando comparados ao Grupo A. Embora apresentem desempenho ligeiramente inferior às condições de referência, mostram-se adequados para aplicações que demandam compromisso entre precisão e produtividade.

Cenário	Altitude	Side Overlap	Forward Overlap	Velocidade	Eco	Taxa	Pontos/m²	GSD	Duração
A70-O70/70-Tri	70 m	70%	70%	8,3 m/s	Triple	160 kHz	499	1,91	00:06:57
A80-O80/80-Tri	80 m	80%	80%	5,5 m/s	Triple	160 kHz	877	2,18	00:10:41
A80-O70/80-Tri*	80 m	70%	80%	8,3 m/s	Triple	160 kHz	436	2,18	00:05:56

Tabela 3 – Grupo B: cenários com alto desempenho e equilíbrio operacional para MDT.
Fonte: Elaboração própria (2026)

Os cenários agrupados no Grupo C (Tabela 4) foram definidos com foco na caracterização da estrutura da vegetação, apresentando maior potencial para a representação dos diferentes estratos do dossel. Essas configurações favorecem a distribuição vertical dos retornos, sendo influenciadas principalmente pela combinação de menor altitude de voo, velocidades reduzidas e uso de múltiplos retornos, o que contribui para uma melhor captura de informações do sub-bosque e maior consistência em modelos derivados, como o Modelo de Altura do Dossel.

Cenário	Altitude	Side Overlap	Forward Overlap	Velocidade	Eco	Taxa	Pontos/m²	GSD	Duração
A60-O70/70-Tri	60 m	70%	70%	7,10 m/s	Triple	160 kHz	680	1,64	00:08:22
A70-O80/80-Tri*	70 m	80%	80%	5,5 m/s	Triple	160 kHz	1003	1,91	00:11:40

Tabela 4 – Grupo C: cenários voltados à caracterização da estrutura da vegetação.
Fonte: Elaboração própria (2026)

O Grupo D (Tabela 5) inclui cenários também voltados à análise da vegetação, porém com caráter mais operacional. Embora apresentem capacidade satisfatória para a representação do dossel, esses cenários tendem a apresentar menor sensibilidade na identificação de estratos mais finos da vegetação, em função de maiores altitudes de voo e menor redundância espacial. Ainda assim, configuram-se como alternativas viáveis em situações que demandam maior cobertura de área com manutenção de qualidade aceitável.

Cenário	Altitude	Side Overlap	Forward Overlap	Velocidade	Eco	Taxa	Pontos/m²	GSD	Duração
A80-O70/70-Tri	80 m	70%	70%	8,3 m/s	Triple	160 kHz	436	2,18	00:05:56
A80-O70/80-Tri*	80 m	70%	80%	8,3 m/s	Triple	160 kHz	436	2,18	00:05:56

Tabela 5 – Grupo D: cenários para análise da vegetação com foco operacional.
Fonte: Elaboração própria (2026)

Por fim, o Grupo E (Tabela 6) corresponde aos cenários orientados à eficiência operacional, sendo utilizados como referência para análise de *trade-offs* entre qualidade e produtividade. Essas configurações são caracterizadas por maiores velocidades de voo e uso de retornos do tipo *dual*, resultando em maior densidade de pontos por unidade de área, porém com limitações na capacidade de penetração no dossel e, consequentemente, na representação do terreno em áreas com vegetação mais densa. Esses cenários são particularmente relevantes para a compreensão dos limites operacionais da tecnologia e para a definição de estratégias de aquisição em função de diferentes objetivos de aplicação.

Cenário	Altitude	Side Overlap	Forward Overlap	Velocidade	Eco	Taxa	Pontos/m²	GSD	Duração
A70-O70/70-Dual	70 m	70%	70%	8,3 m/s	Dual	240 kHz	748	1,91	00:06:57
A80-O70/70-Dual	80 m	70%	70%	8,3 m/s	Dual	240 kHz	654	2,18	00:05:56

Tabela 6 – Grupo E: cenários voltados à eficiência operacional.
Fonte: Elaboração própria (2026)

A partir dessa classificação, procede-se à análise quantitativa dos cenários com base nas métricas de erro obtidas. A avaliação da qualidade dos Modelos Digitais de Terreno foi realizada por meio da comparação entre as superfícies geradas pelos diferentes cenários LiDAR e pontos de checagem obtidos por levantamento GNSS. O erro foi definido como a diferença entre a coordenada altimétrica observada no ponto de checagem e a correspondente cota interpolada no modelo de superfície derivado do LiDAR.

Cenário	Desvio padrão (m)	RMSE (m)	NMAD (m)
A70-O70/70-Tri	0,067119	0,085260	0,031378
A70-O70/70-Tri-X	0,060749	0,081036	0,073230
A80-O70/70-Dual	0,101145	0,102329	0,050901
A70-O70/70-Dual	0,081626	0,090438	0,052349
A80-O70/80-Tri	0,076139	0,092535	0,058910
A60-O70/70-Tri	0,068322	0,099036	0,048322
A80-O70/70-Tri	0,062742	0,069152	0,075379
A70-O80/80-Tri	0,086391	0,095649	0,043413
A80-O80/80-Tri	0,107028	0,112992	0,051444

Tabela 7 - Métricas de erro dos cenários de aquisição LiDAR em relação aos pontos de checagem GNSS.
Fonte: Elaboração própria (2026)

Os resultados evidenciam variações significativas entre os cenários avaliados, com valores de RMSE variando aproximadamente entre 0,07 m e 0,11 m, compatíveis com levantamentos LiDAR aerotransportados em ambientes com cobertura vegetal densa. De modo geral, cenários com maior redundância espacial e uso de múltiplos retornos apresentaram melhor desempenho. Destaca-se, no entanto, que o menor valor de RMSE foi observado no cenário A80-O70/70-Tri, indicando que configurações intermediárias podem alcançar resultados superiores em determinadas condições.

Em contrapartida, cenários orientados à eficiência operacional, especialmente aqueles que utilizam retornos do tipo *dual* e maiores velocidades, apresentaram maior variabilidade e valores de erro mais elevados, evidenciando limitações na representação do terreno em áreas com cobertura vegetal mais densa. Embora alguns cenários operacionais apresentem valores pontuais de erro reduzido, observa-se que configurações com maior redundância e uso de múltiplos retornos apresentam maior consistência global e estabilidade estatística. Observa-se que, além do tipo de retorno, a altitude também influencia significativamente o desempenho dos cenários dual, com pior desempenho associado a maiores altitudes de voo.

Outro aspecto relevante refere-se à presença de valores discrepantes em alguns pontos de checagem, indicando a ocorrência de *outliers*, possivelmente associados a falhas de penetração do feixe laser em regiões de dossel mais fechado ou à presença de interferências locais na superfície. Esses comportamentos reforçam a importância da análise conjunta de métricas robustas, como o NMAD, que se mostrou menos sensível a valores extremos e mais representativo do desempenho global dos cenários. Os valores de NMAD corroboram as tendências observadas no RMSE, indicando maior robustez nos cenários com maior redundância espacial.

De maneira geral, os resultados confirmam que a qualidade do MDT não está diretamente associada apenas à densidade de pontos, mas sim à combinação entre parâmetros operacionais que influenciam a distribuição espacial e vertical dos retornos. Nesse contexto, cenários com múltiplos retornos e maior redundância apresentam maior confiabilidade para aplicações em análise do terreno e da vegetação, especialmente em ambientes complexos como reservas urbanas. No que se refere à caracterização da estrutura da vegetação, observa-se que configurações com menor altitude de voo e uso de múltiplos retornos favorecem uma melhor representação dos diferentes estratos, permitindo maior detalhamento do dossel, sub-bosque e elementos intermediários. Por outro lado, cenários com menor redundância espacial ou maior altitude tendem a apresentar limitações na captura de estruturas mais finas, resultando em menor definição vertical e possível sub-representação de componentes do sub-bosque. Esses resultados indicam que, para aplicações voltadas à análise da vegetação, a escolha dos parâmetros de aquisição deve priorizar a capacidade de distribuição vertical dos retornos, e não apenas a densidade global de pontos.

Considerações Finais

Os resultados obtidos evidenciam que a qualidade dos dados LiDAR adquiridos com RPA em ambientes de reservas urbanas não depende exclusivamente da densidade de pontos, mas da combinação entre parâmetros operacionais que influenciam a distribuição espacial e vertical dos retornos. A análise experimental demonstrou que cenários com maior redundância espacial e uso de múltiplos retornos apresentam melhor desempenho na geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT), especialmente em áreas com cobertura vegetal densa, favorecendo a detecção do solo e a redução de lacunas na nuvem de pontos.

Observou-se, no entanto, que o desempenho dos cenários não segue uma relação linear com os parâmetros analisados, sendo identificado que configurações intermediárias podem alcançar resultados superiores em determinadas condições, como evidenciado pelo menor valor de RMSE observado no cenário A80-O70/70-Tri. Esse comportamento reforça a importância da análise integrada dos parâmetros de aquisição, considerando suas interações e efeitos combinados.

No que se refere à caracterização da estrutura da vegetação, os resultados indicam que cenários com menor altitude de voo e uso de múltiplos retornos são mais eficientes na representação dos diferentes estratos, permitindo maior detalhamento do dossel e do sub-bosque. Por outro lado, configurações voltadas à eficiência operacional, embora apresentem maior produtividade, tendem a limitar a capacidade de representação vertical da vegetação e a precisão na modelagem do terreno em ambientes mais complexos.

Dessa forma, conclui-se que a definição dos parâmetros de aquisição deve estar diretamente associada ao objetivo final da aplicação dos dados geoespaciais, sendo necessário estabelecer estratégias diferenciadas para a geração de MDT e para a análise da estrutura da vegetação. Os resultados deste estudo contribuem para o avanço do conhecimento aplicado ao uso de LiDAR em RPA, destacando a necessidade de desenvolvimento de diretrizes específicas para aquisição de dados em reservas urbanas, considerando as particularidades desses ambientes.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) por meio do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2023. Agradecemos ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), pelo apoio técnico-científico aportado até o momento. Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT), à Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), ao Laboratório de Informação Espacial (SPINLAB) e ao Laboratório de Análise de Imagens Digitais (LAID) pelo apoio recebido. Além disso, agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT), por meio de bolsa concedida no âmbito do Edital n.º 010/2025 - Doutorado com produto tecnológico, processo FAPEMAT-PRO.0002044/2025.

Referências Bibliográficas

AGUSTIYARA, Agustiyara; MUTIARIN, Dyah; NURMANDI, Achmad; KASIWI, Aulia Nur; IKHWALI, M. Faisi. Mapping urban green spaces in Indonesian cities using remote sensing analysis. Urban Science, Basel, v. 9, n. 2, p. 23, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/urbansci9020023.

BREDE, B.; CALDERS, K.; LAU, A.; RAUMONEN, P.; BARTHOLOMEUS, H. M.; HEROLD, M.; KOOISTRA, L. Non-destructive tree volume estimation through quantitative structure modelling: comparing UAV laser scanning with terrestrial LiDAR. Remote Sensing of Environment, v. 233, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111355

DUBAYAH, R.; DRAKE, J. B. Lidar remote sensing for forestry. Journal of Forestry, v. 98, n. 6, p. 44–46, 2000.

GÖLBEY, Aslÿ Güneÿ; AK, Mehmetali. The role of urban green spaces in sustainable urban planning. Journal of Urban and Landscape Planning, v. 6, p. 83–97, 2022.

HYYPPÄ, J.; YU, X.; HYYPPÄ, H.; VASTARANTA, M.; HOLOPAINEN, M.; KUKKO, A.; KAARTINEN, H.; JAAKKOLA, A.; VAAJA, M.; KOSKINEN, J.; et al. Advances in forest inventory using airborne laser scanning. *Remote Sensing*, v. 4, n. 5, p. 1190–1207, 2012. DOI: https://doi.org/10.3390/rs4051190

JAKUBOWSKI, M. K.; GUO, Q.; KELLY, M. Tradeoffs between lidar pulse density and forest measurement accuracy. Remote Sensing of Environment, v. 130, p. 245–253, 2013. DOI: 10.1016/j.rse.2012.11.024

LEFSKY, M. A.; COHEN, W. B.; PARKER, G. G.; HARDING, D. J. Lidar remote sensing for ecosystem studies. BioScience, v. 52, n. 1, p. 19–30, 2002. DOI: 10.1641/0006-3568

TORRESAN, C.; BERTONI, D.; CARLINI, E.; et al. Forestry applications of UAVs in Europe: a review. International Journal of Remote Sensing, v. 38, n. 8–10, p. 2427–2447, 2017. DOI: 10.1080/01431161.2016.1252477

WALLACE, L.; LUCIEER, A.; MALENOVSKÝ, Z.; TURNER, D.; VOPĚNKA, P. Assessment of forest structure using two UAV techniques. Forests, v. 7, n. 3, p. 62, 2016. DOI: 10.3390/f7030062

WULDER, M. A.; WHITE, J. C.; NELSON, R. F.; et al. Lidar sampling for large-area forest characterization. Remote Sensing of Environment, v. 121, p. 196–209, 2012. DOI: 10.1016/j.rse.2012.02.001

ZOU, Hao; WANG, Xiaojun. Progress and gaps in research on urban green space morphology: a review. Sustainability, Basel, v. 13, n. 3, p. 1202, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/su13031202.

MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO AMBIENTAL AUTÔNOMO E CONTÍNUO: GESTÃO PROATIVA DE RISCO EM ZONAS GEOTÉCNICAS SENSÍVEIS

1Alexandre Hainzenreder, 2Andre Zingano

1 Pesquisador CAPES — LPM / Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro, PPGE3M — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais / UFRGS, ahainzenreder@ufrgs.br; 2 Prof. Dr. Andre Zingano — Pesquisador LPM / PPGE3M — UFRGS | Mecânica de Rochas, andrezin@ufrgs.br ***U***

niversidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) — Porto Alegre, RS, *BrasilDEMIN / Departamento de Engenharia de Minas — LPM Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro*

Palavras-chave: monitoramento sismográfico; gestão de risco geotécnico; sistemas autônomos de monitoramento ambiental

Resumo

A incapacidade do monitoramento sismográfico convencional de operar de forma contínua, autônoma e rastreável em zonas geotécnicas complexas configura lacuna técnica relevante na gestão de risco ambiental de obras e estruturas sensíveis. O presente artigo apresenta a tecnologia ZIRKONS de Monitoramento Sismográfico Ambiental Inteligente, um sistema integrado, autônomo e de operação ininterrupta (24/7/365) que transforma dados sismográficos contínuos, coletados em tempo real, em decisões técnicas fundamentadas, eliminando o intervalo crítico entre a ocorrência de um evento dinâmico e a resposta operacional fundamentada. O sistema combina sensores sismográficos de alta precisão, estação de campo com autossuficiência energética fotovoltaica, transmissão contínua de dados via conectividade remota independente e painel operacional centralizado com alertas automáticos escalonados por nível de criticidade. O sistema é parametrizável conforme as normativas DIN 4150-3 (1999), BS 7385-2 (1993) e ABNT NBR 9653 (2018), permitindo a configuração personalizada dos limites de Pico de Velocidade de Partícula (PPV, em mm/s) para cada projeto. São discutidas as aplicações nas frentes de geotecnia, estruturas geotécnicas, movimentação de massa e gestão de desastres naturais, demonstrando-se que a operação autônoma e contínua do sistema contorna as limitações operacionais do monitoramento convencional em contextos de alta complexidade geológica e ambiental. O modelo de monitoramento contínuo e preditivo proposto representa avanço alinhado ao Marco de Sendai para Redução do Risco de Desastres 2015-2030 (UNDRR, 2015) e à Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (Lei nº 12.608/2012), contribuindo para a expansão dos sistemas de alerta precoce e para o fortalecimento da instrumentação técnica do risco geológico no Brasil. O princípio operacional central que distingue esta abordagem é o controle prospectivo dos efeitos gerados: ao detectar e quantificar perturbações dinâmicas antes que atinjam limiares críticos, o sistema atua sobre as causas e os efeitos ainda em sua fase incipiente, antes que se convertam em danos estruturais, impactos ambientais irreversíveis ou passivos legais para o empreendimento.

Introdução

A crescente complexidade dos projetos de infraestrutura urbana, mineração e gestão territorial tem colocado a Engenharia Ambiental diante de um desafio técnico fundamental: como monitorar, em tempo real e de forma contínua, os efeitos dinâmicos gerados por obras e fenômenos naturais em zonas sensíveis, remotas ou de alto risco geológico? Obras civis próximas a estruturas históricas, escavações em zonas urbanizadas, operações de cravação e detonação em áreas com restrição de vizinhança, taludes e encostas instáveis e barragens de rejeitos são contextos que exigem instrumentação capaz de detectar, registrar e comunicar alterações dinâmicas do solo e das estruturas no momento em que ainda são efeitos gerenciáveis, antes que se convertam em danos estruturais, impactos ambientais irreversíveis ou situações de emergência (FELL et al., 2008; KEEFER, 1984). Neste sentido, Carri et al. (2021) demonstraram que sistemas de monitoramento geotécnico baseados em Internet das Coisas (IoT), com aquisição automática de dados e procedimentos de elaboração integrados, constituem instrumentos fundamentais para a prevenção de riscos e para a gestão de eventos críticos em tempo real, evidenciando que a automação do monitoramento ambiental não é apenas uma vantagem operacional, mas o requisito técnico indispensável para a detecção e controle dos efeitos gerados antes que se convertam em danos. No campo do monitoramento de movimentação de massa, Casagli et al. (2023) reforçam que a detecção, o monitoramento contínuo e a predição são elementos fundamentais e inseparáveis para a gestão efetiva do risco de deslizamentos, sendo o monitoramento em tempo real o elo crítico que transforma dados ambientais em capacidade de resposta e proteção. A distinção fundamental entre gerir efeitos e remediar danos não é apenas operacional: é econômica, legal e ética, e define a diferença entre um projeto executado com segurança e um projeto interrompido por colapso.

O monitoramento sismográfico, definido como o processo de captura contínua de ondas sísmicas, vibrações mecânicas e eventos de impacto transmitidos pelo solo e pelas estruturas, com quantificação do Pico de Velocidade de Partícula (PPV, em mm/s) e da frequência predominante dos eventos (Hz), é reconhecido internacionalmente como ferramenta essencial de gestão de risco geotécnico e estrutural (WOODS, 1997; DOWDING, 1985). Normativas de referência, como a DIN 4150-3 (1999), a BS 7385-2 (1993) e a ABNT NBR 9653 (2018), estabelecem limites de PPV diferenciados por tipo de estrutura e frequência de vibração, tornando o monitoramento uma exigência técnica e legal em diversas tipologias de projeto (ATTEWELL; FARMER, 1973).

Apesar de sua relevância, o monitoramento sismográfico convencional apresenta limitações operacionais críticas que restringem sua aplicabilidade: (i) dependência de infraestrutura elétrica e de telecomunicações local; (ii) necessidade de presença técnica continuada em campo para operação e registro; (iii) produção de dados fragmentados, não rastreáveis e incompatíveis com exigências de auditoria; e (iv) ausência de alertas automáticos escalonados por criticidade, o que transfere para o operador humano a responsabilidade de interpretação em tempo real (HILLER; CRABB, 2000; DUNNICLIFF, 1993). Essas limitações tornam-se particularmente críticas em zonas remotas, de difícil acesso, com operação noturna ou em situações de emergência geológica.

Diante dessa lacuna técnica, o presente artigo tem como objetivo apresentar a tecnologia ZIRKONS de Monitoramento Sismográfico Ambiental Inteligente, descrevendo sua arquitetura sistêmica, metodologia de implantação e aplicações nas frentes de geotecnia, estruturas geotécnicas, movimentação de massa e gestão de desastres naturais. A hipótese central sustentada é que sistemas autônomos de monitoramento sismográfico integrado, com transmissão remota contínua e alertas automáticos parametrizados por normativas internacionais, são capazes de superar as barreiras técnicas do monitoramento convencional e de prover ao responsável técnico o insumo decisório mais crítico em qualquer operação de risco: dados contínuos, rastreáveis e auditáveis, disponíveis em tempo real, que fundamentam decisões técnicas baseadas em evidências, reduzem a incerteza operacional e eliminam a dependência de interpretações subjetivas ou de registros fragmentados e tardios.

Material e Métodos

A tecnologia ZIRKONS de Monitoramento Sismográfico Ambiental Inteligente é constituída por quatro subsistemas interdependentes: (i) sensoriamento de campo, (ii) aquisição e processamento local, (iii) transmissão remota de dados e (iv) gestão operacional via painel digital centralizado. A arquitetura foi concebida para operar de forma totalmente autônoma, sem dependência de qualquer infraestrutura externa, o que viabiliza sua implantação em zonas remotas, de alto risco geológico ou com severas restrições operacionais.

O subsistema de sensoriamento emprega sensores sismográficos de alta sensibilidade, com faixa de resposta em frequência adequada à detecção de eventos de relevância estrutural (tipicamente entre 1 Hz e 100 Hz para edificações e estruturas de engenharia civil), instalados em pontos estratégicos definidos por diagnóstico técnico prévio. Os sensores medem a velocidade de vibração das partículas do solo ou da estrutura monitorada, expressando os resultados em termos de PPV (mm/s), parâmetro adotado pelas principais normativas internacionais como critério de avaliação de dano potencial (DIN 4150-3, 1999; BS 7385-2, 1993). A atenuação do PPV com a distância à fonte de vibração segue, empiricamente, a relação de Dowding (1985): PPV = K · (D/√Q)^(-n) (01), onde PPV é o Pico de Velocidade de Partícula (mm/s), D é a distância entre a fonte e o ponto de medição (m), Q é a carga de explosivo por retardo (kg), e K e n são constantes empíricas dependentes das características geotécnicas do meio de propagação.

A unidade de campo concentra as funções de aquisição, processamento inicial do sinal, armazenamento local temporário e estabilidade operacional do sistema. A estação opera com autossuficiência energética por meio de painel fotovoltaico e sistema de armazenamento em bateria de ciclo profundo, garantindo operação ininterrupta independente de fornecimento elétrico externo. A transmissão de dados ocorre de forma contínua via sistema integrado de conectividade remota via satélite, independente de infraestrutura de telecomunicações local, sendo o fluxo de dados enviado em tempo real ao servidor central para processamento, classificação e disponibilização no painel operacional, o que amplia significativamente sua aplicabilidade em ambientes remotos de baixa infraestrutura.

O painel operacional digital centraliza, em interface única, as seguintes funções: (i) status em tempo real de todos os sensores ativos e disponibilidade operacional do sistema; (ii) registro de eventos recentes com atributos de horário, amplitude (PPV em mm/s), frequência predominante (Hz), localização do sensor e nível de criticidade; (iii) emissão de alertas automáticos escalonados em três níveis, Atencional, de Advertência e de Emergência, parametrizados em função dos limiares normativos aplicáveis ao projeto; e (iv) geração de relatórios técnicos padronizados, exportáveis para auditoria e conformidade regulatória. Este encadeamento funcional, da captura do sinal físico à disponibilização da informação qualificada para decisão, é o que operacionaliza o princípio de gestão e controle dos efeitos gerados: cada evento registrado é classificado, contextualizado e comunicado ao responsável técnico antes que sua acumulação ou intensificação produza danos irreversíveis à estrutura monitorada ou ao meio ambiente receptor.

A metodologia de implantação segue protocolo estruturado em quatro etapas sequenciais, descritas na Tabela 01:

Tabela 01: Protocolo de implantação da tecnologia ZIRKONS de Monitoramento Sismográfico Ambiental Inteligente.

Etapa	Denominação	Descrição Técnica
01	Diagnóstico técnico	Levantamento dos riscos geotécnicos e estruturais da operação; identificação dos pontos críticos e sensíveis de medição; análise das normativas aplicáveis (DIN 4150-3, BS 7385-2, NBR 9653); definição dos parâmetros e limiares de criticidade do projeto.
02	Plano de pontos de medição	Definição dos locais de instalação dos sensores por análise de propagação de vibração, geometria da fonte e análise criteriosa de risco; especificação dos tipos e orientações dos sensores; validação da cobertura dos pontos críticos identificados no diagnóstico.

Etapa	Denominação	Descrição Técnica
03	Parametrização e alertas	Configuração personalizada dos limites de PPV (mm/s) por projeto e por sensor; definição dos três níveis de criticidade (Atencional, Advertência, Emergência) com limiares percentuais em relação ao limite normativo; estruturação do fluxo de resposta técnica por nível.
04	Ativação do painel operacional	Integração dos dados de campo ao painel digital; validação da transmissão contínua e dos alertas automáticos; treinamento da equipe operacional; ativação do acompanhamento remoto 24/7/365 e da emissão automática de relatórios técnicos padronizados.

Fonte: Elaborado pelos autores com base na metodologia da tecnologia ZIRKONS (2025).

Os parâmetros normativos de vibração que fundamentam a configuração dos limiares de alerta são apresentados na Tabela 02, sintetizando os valores de referência das três principais normativas aplicáveis em contexto brasileiro:

Tabela 02: Parâmetros normativos de PPV (mm/s) por tipo de estrutura e normativa de referência.

Tipo de Estrutura	DIN 4150-3 (1999) (mm/s)	BS 7385-2 (1993) (mm/s)	ABNT NBR 9653 (2018) (mm/s)
Edificações industriais e comerciais robustas	20 – 50	—	—
Edificações residenciais e similares	5 – 20	5 – 10	≤ 15
Estruturas sensíveis e patrimônio histórico	≤ 3	≤ 2,5	≤ 5
Edificações de alto valor histórico / arqueológico	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 3

Fonte: Compilado pelos autores com base em DIN 4150-3 (1999), BS 7385-2 (1993) e ABNT NBR 9653 (2018). Valores indicativos para frequências entre 10 e 50 Hz; consultar normativa para faixas específicas.

O registro contínuo e autônomo de dados produz, para cada evento detectado, uma série temporal de PPV com resolução temporal suficiente para a caracterização de ondas P, S e superficiais, compondo um banco de dados rastreável, exportável e auditável. Os relatórios técnicos gerados automaticamente contêm o histórico completo de eventos, os picos de PPV registrados por sensor, a correlação com os limiares normativos e a análise de conformidade, constituindo documentação hábil para auditorias ambientais, processos de licenciamento e defesa técnica em instâncias regulatórias. Os limites normativos são adaptáveis conforme o objetivo, a sensibilidade e a complexidade de cada cenário específico de monitoramento.

Resultados e Discussão

A tecnologia ZIRKONS de Monitoramento Sismográfico Ambiental Inteligente demonstra aplicabilidade técnica direta e imediata em quatro frentes de relevância crítica para a Engenharia Ambiental. Em todas elas, a característica técnica central e comum do sistema é a capacidade de fornecer ao responsável técnico dados contínuos e rastreáveis em tempo real que sustentam decisões técnicas baseadas em evidências, calibradas por normativas e limiares de criticidade previamente parametrizados, substituindo o modelo convencional, baseado em registros periódicos e interpretações a posteriori (interpretação posterior ao evento), por um ciclo contínuo de monitoramento 24/7/365, alerta e resposta fundamentada. Este paradigma é consistente com o que Carri et al. (2021) denominam abordagem Internet of Natural Hazards (IoNH), na qual a integração entre coleta automática de dados, transmissão contínua, armazenamento estruturado e elaboração automatizada cria um sistema integrado de gestão de riscos naturais capaz de antecipar eventos críticos e suportar protocolos de alerta e evacuação com um nível de eficiência e rastreabilidade estruturalmente superior aos métodos de monitoramento manual e periódico, que operam por amostragem temporal e registros não contínuos. A análise a seguir discute cada frente com base nas normativas vigentes e na literatura científica especializada.

Na frente de geotecnia, o monitoramento sismográfico viabiliza o controle quantitativo dos efeitos dinâmicos gerados por operações de escavação mecânica, cravação de estacas por percussão, compactação de solos e execução de fundações profundas em áreas com restrição de vizinhança. Atividades desta natureza produzem ondas de vibração que se propagam pelo solo e podem induzir danos progressivos a edificações adjacentes, tubulações enterradas e equipamentos sensíveis, com distribuição espacial do PPV governada pelas propriedades geomecânicas do meio de propagação (MASSARSCH; FELLENIUS, 2008; ATTEWELL; FARMER, 1973). O sistema ZIRKONS, ao capturar em tempo real os valores de vibração em múltiplos pontos de medição e compará-los automaticamente com os limiares configurados segundo as normativas aplicáveis, e critérios particulares, permite ao responsável técnico tomar decisões imediatas e fundamentadas sobre a continuidade, alteração ou interrupção da atividade, eliminando o intervalo crítico entre o evento de vibração e a resposta operacional que caracteriza o monitoramento convencional. Este é o mecanismo pelo qual o sistema converte a gestão reativa de danos em gestão proativa de

efeitos: ao invés de registrar o dano após sua manifestação e buscar responsabilidades, o sistema controla o efeito enquanto ainda é reversível, ajustando a operação, reduzindo a energia da fonte ou reposicionando equipamentos antes que o limiar de dano seja atingido.

Para estruturas geotécnicas, incluindo taludes de corte e aterro, muros de contenção, cortinas atirantadas e barragens, o monitoramento sismográfico contínuo permite a detecção precoce de variações no padrão dinâmico da estrutura, que podem indicar processos de instabilização incipiente antes que se manifestem como deformações visíveis ou registráveis por instrumentação estática convencional (MIKKELSEN, 1996; DUNNICLIFF, 1993). A hipótese técnica subjacente é que estruturas geotécnicas em processo de instabilização exibem alteração progressiva na resposta dinâmica, traduzida em variações de amplitude, frequência e forma de onda dos eventos registrados, antes do colapso macroscópico, o que confere ao monitoramento sismográfico caráter precursor e não apenas reativo (KEEFER, 1984; IVERSON, 2000). A rastreabilidade do histórico de dados permite ainda correlacionar eventos sísmicos regionais, detonações próximas ou episódios de precipitação intensa com alterações no comportamento dinâmico da estrutura, fornecendo subsídios técnicos para a avaliação contínua da segurança estrutural e para a revisão dos critérios de alerta.

No contexto de movimentação de massa, o monitoramento sismográfico ambiental representa avanço qualitativo significativo em relação às abordagens convencionais de instrumentação geotécnica, que se baseiam predominantemente em medidores de deslocamento (inclinômetros, extensômetros e pinos de recalque) com leituras periódicas e não contínuas. Casagli et al. (2023), em revisão técnica publicada na Nature Reviews Earth & Environment, afirmam que a detecção, o monitoramento e a predição são elementos fundamentais para a gestão do risco de deslizamentos, e que a eficácia deste processo é diretamente proporcional à capacidade de monitoramento contínuo e em tempo real, reforçando a importância de sistemas autônomos, como o descrito neste artigo, que operam independentemente de infraestrutura local e mantêm funcionamento ininterrupto em condições de campo adversas. Deslizamentos translacionais e rotacionais, fluxos de detritos e solifluxão são fenômenos que frequentemente se desenvolvem a partir de perturbações dinâmicas de baixa amplitude e curta duração, relacionadas a sismos locais, detonações, tráfego ou eventos de precipitação extrema, que precedem o colapso macroscópico (IVERSON, 2000; KEEFER, 1984). A capacidade do sistema ZIRKONS de registrar essas perturbações de forma contínua e autônoma, e de acionar automaticamente alertas escalonados com base nos limiares de vibração configurados, cria a base técnica para sistemas de alerta precoce efetivos, capazes de suportar protocolos de evacuação preventiva antes que o colapso seja inevitável. Esta aplicação é de particular relevância no contexto brasileiro, onde a recorrência de eventos de movimentação de massa em encostas urbanas e periurbanas gera, sistematicamente, perdas humanas e materiais de grande magnitude (DEFESA CIVIL NACIONAL, 2022).

A frente de gestão de desastres naturais sintetiza e expande as três frentes anteriores, posicionando o sistema ZIRKONS como instrumento de apoio à tomada de decisão em situações de emergência geológica. A combinação de autossuficiência energética, conectividade remota independente de infraestrutura local e operação 24/7/365 permite que o sistema mantenha funcionamento pleno em cenários onde a infraestrutura convencional de energia e comunicação foi comprometida pelo próprio desastre, condição operacional impossível para sistemas de monitoramento convencionais (DUNNICLIFF, 1993; MASSARSCH; FELLENIUS, 2008). A transmissão contínua de dados para centros de gestão de emergência, com alertas automáticos escalonados e histórico rastreável, viabiliza respostas técnicas mais rápidas, fundamentadas e auditáveis, alinhando-se às prioridades de ação do Marco de Sendai para Redução do Risco de Desastres 2015-2030 (UNDRR, 2015), especialmente à Prioridade 4, que trata do reforço à prontidão para desastres para uma resposta eficaz.

A Tabela 03 sintetiza as quatro frentes de aplicação, com descrição do problema técnico, da forma de aplicação do sistema e das evidências técnicas produzidas:

Tabela 03: Síntese das aplicações da tecnologia ZIRKONS por frente de atuação em Engenharia Ambiental e Geotecnia.

Frente de Aplicação	Problema Técnico Central	Aplicação do Sistema ZIRKONS	Evidência Técnica Produzida
Geotecnia	Controle de vibrações geradas por escavações, cravações e compactações em zonas com restrição de vizinhança sensível.	Monitoramento contínuo multicanal com alertas automáticos escalonados e relatórios por evento ou turno de obra, ficha técnica operacional diária.	Série histórica de eventos com conformidade verificada frente a DIN 4150-3, BS 7385-2 e NBR 9653; base documental para auditorias e defesa jurídico-técnica.
Estruturas Geotécnicas	Detecção precoce de alterações no padrão dinâmico de taludes, aterros, muros de contenção e barragens indicativas de instabilização incipiente.	Sensores em pontos críticos definidos em diagnóstico, com registro histórico contínuo e correlação com eventos externos (sismos, precipitação, detonações).	Histórico rastreável de eventos dinâmicos com indicadores de tendência temporal para avaliação contínua da segurança estrutural e revisão de limiares de alerta.
Movimentação de Massa	Identificação de perturbações dinâmicas precursoras de deslizamentos, fluxos de	Sistema autônomo em campo com alertas em tempo real integrados a protocolos de evacuação;	Registros temporais de eventos precursores classificados por criticidade; base técnica para

Frente de Aplicação	Problema Técnico Central	Aplicação do Sistema ZIRKONS	Evidência Técnica Produzida
	detritos e solifluxão em encostas monitoradas.	operação independente de infraestrutura local.	sistemas de alerta precoce de apoio à Defesa Civil.
Desastres Naturais	Monitoramento contínuo de zonas de risco geológico com exigência de operação ininterrupta em cenários de infraestrutura comprometida.	Estação de campo autossuficiente com transmissão remota contínua; funcional em áreas sem energia ou telecomunicações convencionais.	Dados sismográficos contínuos e auditáveis para gestão de emergência, planejamento territorial e instrumentação técnica do risco geológico.

Fonte: Elaborado pelos autores com base na tecnologia ZIRKONS e em literatura especializada (2025).

Do ponto de vista da conformidade normativa e rastreabilidade técnica, a produção contínua e automatizada de relatórios padronizados representa vantagem técnica e operacional determinante em relação ao monitoramento convencional. Em contextos de exigência regulatória crescente, como os definidos pela Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (Lei nº 12.608/2012), pelas resoluções CONAMA aplicáveis ao monitoramento ambiental de obras e pelas diretrizes da ABNT NBR ISO 14001 (2015) para Sistemas de Gestão Ambiental, a disponibilidade de dados contínuos, auditáveis e rastreáveis não é apenas um diferencial operacional, mas uma exigência legal e normativa que o monitoramento convencional frequentemente não consegue atender de forma plena.

A transição do paradigma reativo, baseado em inspeções periódicas e registros manuais, com resposta posterior ao evento, para um modelo preditivo e contínuo, como o proporcionado pela tecnologia ZIRKONS, representa avanço qualitativo que se alinha às diretrizes internacionais de redução de risco de desastres. Em particular, o Marco de Sendai 2015-2030 (UNDRR, 2015) estabelece, entre suas metas globais, o aumento substancial da disponibilidade de sistemas de alerta precoce multirrisco e de acesso a informações e avaliações de risco de desastres, objetivos que sistemas desta natureza, pela sua autonomia, continuidade e capacidade de comunicação remota, contribuem diretamente para alcançar.

Considerações Finais

O presente artigo demonstrou, com fundamento técnico e bibliográfico, que a tecnologia ZIRKONS de Monitoramento Sismográfico Ambiental Inteligente constitui resposta técnica fundamentada à lacuna existente no monitoramento sismográfico convencional, viabilizando a gestão de risco ambiental contínua, autônoma e rastreável em contextos geotécnicos e geológicos de alta complexidade. O eixo central desta contribuição, e a premissa que distingue a abordagem proposta das metodologias tradicionais, é a capacidade de transformar dados sismográficos contínuos e rastreáveis, coletados de forma ininterrupta e em tempo real, em decisões técnicas fundamentadas: decisões que chegam no momento certo, baseadas em evidências concretas, conformes às normativas aplicáveis, critérios estabelecidos e documentadas para rastreabilidade e auditoria.

A arquitetura integrada do sistema, sensores de alta precisão com resposta em frequência adequada a estruturas sensíveis e zonas críticas de alta complexidade, com estação de campo com autossuficiência energética sustentável em sistema fotovoltaico, transmissão remota contínua e painel operacional centralizado com alertas automáticos parametrizados segundo DIN 4150-3, BS 7385-2 e ABNT NBR 9653, supera as quatro limitações estruturais do monitoramento convencional identificadas na Introdução, viabilizando sua aplicação em zonas remotas, sensíveis, de alto risco geológico e em cenários de operação em emergência. Mais do que um sistema de registro, trata-se de um instrumento de gestão e controle dos efeitos gerados por uma operação ou por um fenômeno natural: ao atuar sobre o efeito ainda em sua fase mensurável e reversível, antes que se converta em dano estrutural, impacto ambiental ou emergência geológica, o sistema desloca a linha de intervenção técnica de depois do dano para antes do dano, que é onde a engenharia ambiental e geotécnica deve operar para assegurar efetividade técnica e responsabilidade frente aos riscos envolvidos.

A conformidade normativa assegurada pela parametrização personalizada dos limiares críticos, aliada à produção automática de relatórios técnicos auditáveis, posiciona o sistema como instrumento estratégico para conformidade regulatória no contexto do licenciamento ambiental, da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil e dos sistemas de gestão ambiental baseados na ABNT NBR ISO 14001 (2015).

Como limitação a ser superada em etapas futuras, destaca-se a necessidade de desenvolvimento de modelos de correlação entre os dados de vibração coletados pelo sistema e os modelos numéricos de estabilidade de taludes e estruturas geotécnicas, o que ampliaria o alcance preditivo do sistema para além da detecção de eventos e em direção ao prognóstico de instabilidade.

Do ponto de vista da gestão de riscos, a tecnologia ZIRKONS representa uma mudança de paradigma operacional: a migração do modelo tradicional de gestão reativa, que responde ao dano após sua ocorrência, para um modelo de gestão prospectiva e contínua do risco, no qual a tomada de decisão é alimentada por dados em tempo real, limiares parametrizados e alertas automáticos escalonados por criticidade. Este modelo se alinha diretamente aos princípios do gerenciamento de riscos estabelecidos pela ABNT NBR ISO 31000 (2018), que preconiza a identificação, análise, avaliação e tratamento contínuos dos riscos como processo cíclico, integrado à operação e à gestão organizacional. No contexto de obras em zonas sensíveis, operações

de mineração, monitoramento de estruturas geotécnicas e gestão de encostas, a capacidade do sistema de detectar perturbações dinâmicas antes que atinjam limiares críticos, e de registrar evidências rastreáveis de cada evento, transforma o monitoramento sismográfico inteligente em instrumento central do ciclo de gestão de riscos: identificando perigos pelo sensoriamento contínuo, quantificando a exposição pelo histórico de PPV, avaliando a criticidade pelos alertas escalonados e provendo a resposta técnica pelo fluxo operacional parametrizado. A conformidade deste ciclo com as exigências de licenciamento ambiental, de auditoria por órgãos reguladores e de Planos de Ação de Emergência (PAE) consolida o sistema como componente estratégico e indispensável na estrutura de gestão de riscos de empreendimentos que operam em zonas de alta sensibilidade geotécnica e ambiental.

Recomenda-se que estudos futuros avaliem a integração do monitoramento sismográfico contínuo com outras modalidades de instrumentação geotécnica (inclinômetros, piezômetros, medidores de recalque) e com plataformas de sensoriamento remoto orbital (InSAR — Interferometric Synthetic Aperture Radar; LiDAR - Light Detection and Ranging), potencializando a capacidade de detecção e prognóstico de instabilidades geotécnicas em escala regional; além disso, recomenda-se o desenvolvimento de estudos de caso com dados quantitativos de projetos reais, visando à consolidação da base empírica do sistema e à sua inserção em periódicos indexados em bases internacionais de alto impacto na área de Engenharia Ambiental e Geotecnia.

Agradecimentos

Os autores agradecem às equipes técnicas de campo envolvidas na operação e validação do sistema, e às instituições que contribuíram com dados, experiências e revisão crítica para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9653: Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas — Avaliação dos efeitos das vibrações originadas por explosões e seus impactos sobre as estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14001: Sistemas de gestão ambiental — Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 31000: Gestão de riscos — Diretrizes. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ATTEWELL, P. B.; FARMER, I. W. Attenuation of ground vibrations from pile driving. Ground Engineering, v. 6, n. 4, p. 26-29, 1973.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil — PNPDEC. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 11 abr. 2012.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 7385-2: Evaluation and measurement for vibration in buildings — Part 2: Guide to damage levels from groundborne vibration. London: BSI, 1993.

CARRI, A.; VALLETTA, A.; CAVALCA, E.; SAVI, R.; SEGALINI, A. Advantages of IoT-based geotechnical monitoring systems integrating automatic procedures for data acquisition and elaboration. Sensors, v. 21, n. 6, p. 2249, 2021.

CASAGLI, N.; INTRIERI, E.; TOFANI, V.; GIGLI, G.; RASPINI, F. Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques. Nature Reviews Earth & Environment, v. 4, n. 1, p. 51-64, 2023.

DEFESA CIVIL NACIONAL. Relatório de danos humanos e materiais causados por desastres naturais no Brasil. Brasília: Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil — SEDEC / Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional, 2022.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 4150-3: Erschütterungen im Bauwesen — Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen. Berlin: DIN, 1999.

DOWDING, C. H. Blast vibration monitoring and control. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985.

DUNNICLIFF, J. Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. New York: John Wiley & Sons, 1993.

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W. Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. Engineering Geology, v. 102, n. 3-4, p. 85-98, 2008.

HILLER, D. M.; CRABB, G. I. Groundborne vibration caused by mechanised construction works. TRL Report 429. Crowthorne: Transport Research Laboratory, 2000.

IVERSON, R. M. Landslide triggering by rain infiltration. Water Resources Research, v. 36, n. 7, p. 1897-1910, 2000.

KEEFER, D. K. Landslides caused by earthquakes. Geological Society of America Bulletin, v. 95, n. 4, p. 406-421, 1984.

MASSARSCH, K. R.; FELLENIUS, B. H. Ground vibrations induced by impact pile driving. In: PROCEEDINGS OF THE 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CASE HISTORIES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, 2008, Arlington. Rolla: University of Missouri, 2008.

MIKKELSEN, P. E. Landslide monitoring and the determination of slope movements. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. (Ed.). Landslides: investigation and mitigation. Washington: National Academy Press, 1996. p. 610-636. (Special Report 247).

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION — UNDRR. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. Geneva: UNDRR, 2015.

WOODS, R. D. Dynamic effects of pile installations on adjacent structures. NCHRP Synthesis 253. Washington: Transportation Research Board, 1997.

DESEMPENHO DE PRODUTOS GRADEADOS DE PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO RIO SOTURNO EM CONTEXTO DE EXTREMOS HIDROCLIMÁTICOS

1 Limber Zenteno Aguilera, 1 Daniel Gustavo Allasia Piccilli, 1 João Francisco Carlexo Horn, 2 Moisés Perales Avilés, 1 Rutineia Tassi, 1 Camila Caballero Cristaldo, 1Eliane Fischborn, 1 Gabriel Sulzbach Pereira

1 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: limberzent.agui@gmail.com; dallasia@gmail.com. 2 Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, e-mail: moisesperalesaviles@gmail.com.

Palavras-chave: Precipitação; Sensoriamento Remoto; Avaliação de Desempenho.

Resumo

A precipitação é uma variável essencial para a compreensão dos processos hidrológicos, a gestão dos recursos hídricos e o monitoramento de eventos extremos. Entretanto, a disponibilidade de séries pluviométricas contínuas e espacialmente representativas ainda é limitada em muitas regiões, incluindo a bacia do Rio Soturno, no centro do Rio Grande do Sul, onde essa lacuna dificulta estudos de inundações, secas e eventos extremos — análises cada vez mais necessárias diante das mudanças climáticas em curso. Diante desse cenário, este trabalho avaliou o desempenho de três produtos gradeados de precipitação — CHIRPS, ERA5-Land e GPM-IMERG —, comparando suas estimativas com dados observados em cinco estações pluviométricas obtidas junto à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As estimativas foram extraídas via plataforma Climate Engine e analisadas nas escalas diária e mensal por meio de indicadores estatísticos de associação, erro e viés. Na escala diária, o GPM-IMERG apresentou maior associação com os dados observados, enquanto o ERA5-Land registrou menores erros médios. Na escala mensal, CHIRPS e GPM-IMERG apresentaram desempenho geral superior. No ciclo anual médio, o ERA5-Land foi o produto com acumulado mais próximo ao observado, com subestimação de 4,06%. No evento extremo de maio de 2024, quando a precipitação regional ultrapassou 600 mm, todos os produtos subestimaram os valores observados, mas o GPM-IMERG apresentou a menor diferença. Ressalta-se que os resultados constituem uma análise preliminar, sendo necessária uma avaliação mais detalhada, com maior densidade de estações e períodos mais longos, antes de recomendar o uso sistemático desses produtos na região. Como limitação metodológica, não se pode garantir que as estações utilizadas na validação sejam totalmente independentes dos processos de calibração do CHIRPS e do GPM-IMERG, o que pode introduzir algum grau de circularidade na avaliação. Este trabalho oferece um caminho metodológico para regiões com dados escassos, demonstrando que produtos gradeados de precipitação por satélite e reanálise são ferramentas valiosas de apoio, desde que aplicados com critério e escala adequados.

Introdução

A precipitação, por ser o principal componente de entrada do ciclo hidrológico, é a base para diversos setores, desde a gestão de recursos hídricos e a agricultura (Araghi et al., 2021) até a análise de eventos extremos, como inundações e secas (Hinge et al., 2022; Zhong et al., 2019). Sua caracterização influencia diretamente processos físicos, químicos e biológicos, além de reger a dinâmica hidrológica em bacias hidrográficas.

Nesse contexto, a variabilidade espacial e temporal das chuvas desempenha um papel determinante na compreensão do escoamento superficial e da geração de vazão. Consequentemente, a precisão dessas informações é vital para o desempenho de modelos hidrológicos, uma vez que inconsistências nos registros podem comprometer severamente as análises e a tomada de decisão (Acharya et al., 2019; Sadeghi et al., 2021).

Embora a obtenção de dados confiáveis dependa de redes de monitoramento densas e bem distribuídas compostas por pluviômetros e pluviógrafos (Ceccherini et al., 2015; Satgé et al., 2019), essa condição raramente é plenamente atendida. Em países em desenvolvimento, o cenário é agravado por limitações de infraestrutura, altos custos de manutenção e a presença de áreas remotas, como florestas tropicais e regiões montanhosas (Afonso et al., 2020; Satgé et al., 2019; Wang; Zhong; Lai, 2017). Como resultado, muitas regiões operam abaixo dos requisitos mínimos estabelecidos pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2008). Somam-se a isso as limitações intrínsecas aos sensores terrestres, que incluem cobertura espacial restrita, presença de lacunas temporais e baixa precisão em zonas pouco povoadas (Hafizi; Sorman, 2022; Sun et al., 2018). Por fim, políticas restritivas de compartilhamento de informações representam um obstáculo adicional, dificultando o acesso a séries pluviométricas essenciais para o avanço da ciência hidrológica (Hafizi; Sorman, 2022).

Diante da escassez de dados terrestres, torna-se necessário adotar fontes alternativas que ofereçam densidade espacial e viabilidade econômica. Nesse cenário, os produtos gradeados de precipitação consolidaram-se como ferramentas suplementares para o monitoramento e a modelagem hidrológica, sobretudo em regiões com baixa disponibilidade de dados observados. Entretanto, seu desempenho depende da escala temporal, do contexto regional e da validação local, especialmente em áreas hidrologicamente complexas (Cerón et al., 2020; Conte; Tassi; Bayer, 2026).

Dentre os produtos gradeados de precipitação mais utilizados destacam-se o CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*), o GPM/IMERG (*Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement*) e o ERA5-Land (*ECMWF Reanalysis v5 Land*). O CHIRPS combina estimativas por infravermelho com dados de estações

pluviométricas, sendo empregado em estudos climáticos e hidrológicos (Funk et al., 2015). O GPM/IMERG integra observações de múltiplos satélites, por sensores de micro-ondas e infravermelho, fornecendo estimativas com frequência temporal (Huffman et al., 2020). Já o ERA5-Land corresponde a uma reanálise climática, baseada na integração entre modelos atmosféricos e informações da superfície terrestre, disponibilizando séries hidrometeorológicas contínuas e espacialmente consistentes (Muñoz-Sabater et al., 2021).

A relevância dessas ferramentas é evidenciada pela realidade do Rio Grande do Sul, Estado com histórico recorrente de extremos hidroclimáticos. Neste contexto, estiagens severas comprometeram o abastecimento e a economia gaúcha: o evento de 2019-2020 destacou-se pelo forte déficit hídrico (Fernandes et al., 2021), seguido pelos períodos de 2021/2022 e 2022/2023, que atingiram, respectivamente, 84% e 78% dos municípios do Estado (De Freitas; Barcellos, 2024).

Em contraste à seca, a intensificação da variabilidade climática também se manifestou em cheias catastróficas. Entre 2023 e 2024, o Estado enfrentou episódios de chuvas persistentes e excepcionais (ANA, 2025). Segundo Reboita et al. (2024), o evento de 2024 registrou acumulados superiores a 400 mm na região centro-norte; em Santa Maria, maio de 2024 marcou a maior precipitação diária (213,6 mm) e o maior volume em três dias consecutivos (470,7 mm) em mais de um século de observações (Nied et al., 2024). Tais eventos configuram uma crise de magnitude infraestrutural e social que reforça a urgência em aprimorar sistemas de previsão e monitoramento.

Contudo, embora os produtos gradeados de precipitação sejam alternativas relevantes às deficiências das redes de solo, essas estimativas estão sujeitas a vieses sistemáticos e erros aleatórios (Shen et al., 2014). Portanto, a validação desses dados em comparação com séries pluviométricas terrestres é uma etapa necessária para avaliar sua confiabilidade em aplicações hidrológicas e climáticas (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2008).

Nesse contexto, o presente estudo avaliou o desempenho dos produtos de precipitação CHIRPS, GPM/IMERG e ERA5-Land, comparando suas estimativas com dados de cinco estações pluviométricas situadas no entorno da Bacia Hidrográfica do Rio Soturno, área estratégica para a compreensão desses fenômenos na região.

Material e Métodos

Local de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Soturno (BHRS) está situada na porção central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O rio Soturno constitui um afluente da margem esquerda do rio Jacuí, integrando, portanto, a região hidrográfica do Guaíba. A BHRS apresenta uma área de drenagem de aproximadamente 982,02 km² e abrange, total ou parcialmente, os municípios de Júlio de Castilhos — onde se localizam as nascentes do rio —, Nova Palma, Ivorá, Silveira Martins, Faxinal do Soturno, Dona Francisca, São João do Polêsine e Restinga Sêca, conforme ilustrado na Figura 1.

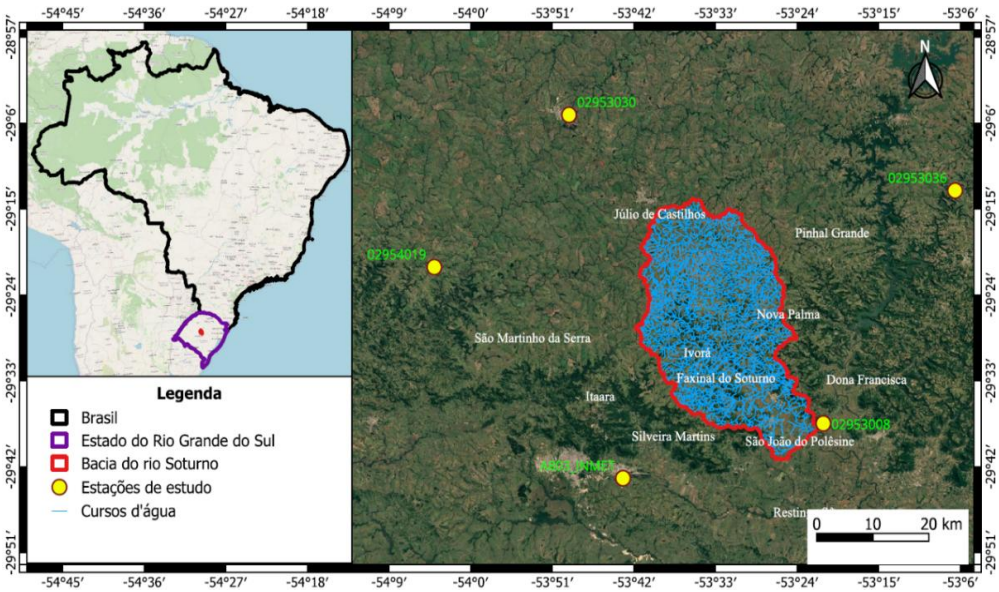


Figura 01: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Soturno no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.
Fonte: Autores (2026)

Dados de precipitação e produtos gradeados

Os dados de precipitação diários foram obtidos a partir de estações pluviométricas pertencentes às redes de monitoramento da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), sendo ambos utilizados como referência para a validação das estimativas de precipitação provenientes dos produtos gradeados analisados.

As características das estações pluviométricas, incluindo sua localização e as séries históricas utilizadas, estão apresentadas na Tabela 1.

Estação	Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)	Período analisado	Anos não analisados	Distância das estações à BHRS (km)
02953030	29°05'08,16"	53°49'09,12"	444	01/01/2001 - 31/12/2024	2002, 2006, 2007, 2009, 2010, 2012, 2015	24
02953036	29°13'04,08"	53°06'34,92"	260	01/01/2017-31/12/2024	Não houve exclusão de anos completos	35
02954019	29°21'05,04"	54°04'00,84"	438	01/01/2001 - 31/12/2024	2002, 2004, 2007, 2009, 2010	37
02953008	29°37'36,84"	53°17'03,84"	45	01/01/2001 - 31/12/2024	2002, 2004, 2007, 2009, 2010, 2014, 2015	1
A803	29°43'28,92"	53°43'14,16"	88	01/01/2003 - 31/12/2024	Não houve exclusão de anos completos	17

Tabela 01: Dados das estações pluviométricas da ANA e INMET.
Fonte: Autores (2026)

Para as estações pluviométricas, foi realizada uma análise preliminar de consistência das séries de precipitação, visando identificar lacunas, falhas expressivas e possíveis inconsistências nos registros observados. Não foi realizado preenchimento de falhas nem correção dos dados ausentes. Foram excluídos os anos com menos de 340 dias medidos ou erro acumulado anual superior a 20%; assim, as comparações com CHIRPS, ERA5-Land e GPM-IMERG consideraram apenas anos válidos de cada estação e períodos coincidentes entre as séries observadas, para garantir reprodutibilidade.

As estimativas de precipitação diária dos produtos CHIRPS, GPM-IMERG e ERA5-Land foram obtidas por meio da plataforma Climate Engine, na localização geográfica de cada estação pluviométrica, utilizando as coordenadas de latitude e longitude apresentadas na Tabela 1. Como os produtos analisados são disponibilizados em grades espaciais, os valores extraídos correspondem à célula de grade associada à coordenada de cada posto pluviométrico.

Após a aquisição, as séries foram organizadas em formato tabular, com conferência e padronização das datas entre os produtos e os dados observados. Como as estações apresentaram diferentes períodos de disponibilidade, as comparações foram realizadas apenas nos períodos coincidentes e válidos de cada estação. A escala mensal foi obtida a partir da soma dos dados diários, desconsiderando anos sem dados ou com falhas expressivas, a fim de evitar que ausências de registro fossem interpretadas como precipitação nula. As características dos produtos avaliados são apresentadas na Tabela 2.

Produto gradeado de precipitação	Resolução espacial	Método de estimativa	Referência
Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data - CHIRPS	0,05ºx0,05º	Infravermelho	(Funk et al., 2015)
Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM - IMERG	0,1°x0,1°	Micro-ondas e infravermelho	(Huffman et al., 2020)
ECMWF Reanalysis v5 Land — ERA5-Land	0,1°x0,1°	Reanálise climática baseada em modelo físico	Muñoz-Sabater et al. (2021)

Tabela 02: Informações e referências dos produtos gradeados de precipitação utilizados no estudo.
Fonte: Autores (2026)

Análise de desempenho dos produtos gradeados de precipitação

Diferentes indicadores estatísticos foram aplicados para avaliar o desempenho dos produtos gradeados de precipitação CHIRPS, GPM/IMERG e ERA5-Land nas escalas diária e mensal. Como referência, foram utilizados os dados observados nas estações pluviométricas da ANA e do INMET, considerando apenas os períodos coincidentes entre as séries estimadas e observadas. Foram empregados o R^2, MBE, |MBE|, MAE e RMSE, a fim de avaliar a associação, o viés e a magnitude dos erros entre as estimativas dos produtos e os dados pluviométricos de referência.

O coeficiente de determinação R^2 (Equação 1): varia entre 0 e 1, sendo que 1 corresponde ao ajuste perfeito e 0 que não há correlação entre os dados (Rodgers; Nicewander, 1988).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (P_i^{est} - P_{est}^{méd})(P_i^{ref} - P_{ref}^{méd})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (P_i^{est} - P_{est}^{méd})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (P_i^{ref} - P_{ref}^{med})^2}} \right]^2 \quad (01)$$

Onde: P_i^{est} é o valor estimado no instante i, P_i^{ref} é o valor de referência (observado) no instante i, $P_{est}^{méd}$ é a média dos valores estimados, $P_{ref}^{méd}$ é a média dos valores observados e n é o número total de observações.

O MBE (Erro Médio de Tendência) (Equação 2), indica a tendência média do produto em superestimar ou subestimar a precipitação em relação aos dados observados. Valores positivos de MBE indicam superestimativa da precipitação, enquanto

valores negativos indicam subestimativa. Valores próximos de zero representam menor viés médio e, portanto, melhor concordância entre o produto avaliado e os dados de referência.

$$MBE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_{est,i} - P_{ref,i}) \quad (02)$$

|MBE| (Erro Médio Absoluto de Tendência) (Equação 3): Expressa a magnitude do viés médio do produto avaliado em relação aos dados observados, desconsiderando o sentido do erro. Quanto menor o valor de |MBE|, menor é o viés médio do produto em relação à precipitação observada.

$$|MBE| = \left|\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_{est,i} - P_{ref,i})\right| \quad (03)$$

MAE (Erro Absoluto Médio) (Equação 4): Média das diferenças absolutas entre os valores de precipitação estimados pelo produto avaliado e os valores observados. Esse indicador representa a magnitude média dos erros, sem considerar se o produto superestima ou subestima a precipitação. Quanto menor o valor de MAE, melhor é o desempenho do produto, pois menor é o erro médio em relação aos dados de referência.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|P_{est,i} - P_{ref,i}\right| \quad (04)$$

RMSE (Raiz do Erro Quadrático Médio) (Equação 5): Quanto menor o valor do RMSE, menor será a incerteza nos dados (Liu et al., 2019; Moriasi et al., 2007).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_{est,i}-P_{ref,i})^2}{n}} \quad (05)$$

Para sintetizar a comparação entre os produtos CHIRPS, ERA5-Land e GPM/IMERG, foi aplicado um ranqueamento relativo a partir dos indicadores estatísticos calculados nas escalas diária e mensal. Para cada métrica, os produtos foram ordenados de 1 a 3, sendo atribuída a posição 1 ao produto com valor mais favorável segundo o critério matemático de cada indicador, e a posição 3 ao produto com valor menos favorável.

Comparação temporal dos produtos de precipitação

Na sequência, avaliou-se a capacidade dos produtos em representar o ciclo anual médio da precipitação regional. A média mensal regional foi obtida a partir das climatologias individuais das cinco estações, considerando apenas anos válidos e atribuindo o mesmo peso a cada posto. A concordância entre totais mensais observados e estimados foi avaliada por gráficos de dispersão, verificando a proximidade em relação à linha 1:1 e possíveis desvios em diferentes faixas de precipitação. Dada a relevância dos eventos extremos recentes no Rio Grande do Sul, também se avaliou o comportamento dos produtos em 2024, com ênfase nos meses de maior acumulado pluviométrico, permitindo analisar tanto o padrão sazonal quanto os acumulados extremos em conjunto com os indicadores estatísticos de desempenho. Ressalta-se que não foi realizada correção de defasagem horária entre os registros pluviométricos e o período de acumulação dos produtos gradeados, aspecto que pode influenciar as métricas diárias, com efeito reduzido na escala mensal.

Resultados e Discussão

A avaliação dos produtos CHIRPS, ERA5-Land e GPM/IMERG evidenciou diferenças de comportamento entre as resoluções diária e mensal. A Tabela 03 apresenta os valores médios de R^2, MBE, |MBE|, MAE e RMSE obtidos a partir da comparação entre as estimativas e os dados observados nas cinco estações pluviométricas. De modo geral, os resultados apontam menor ajuste no nível diário e melhor resposta na agregação mensal, sugerindo que a integração temporal reduz parte das incertezas associadas à estimativa da precipitação.

Escala	Produto	R^2	MBE (mm)	|MBE| (mm)	MAE (mm)	RMSE (mm)
Diária	CHIRPS	0,1937	-0,1063	0,2330	6,1612	13,9506
Diária	ERA5-Land	0,2038	-0,5586	0,5586	5,7085	13,2308
Diária	GPM-IMERG	0,2175	0,2394	0,2394	6,1763	14,4538
Mensal	CHIRPS	0,7060	-3,2893	7,0234	37,4396	53,8023
Mensal	ERA5-Land	0,5681	-16,9061	16,9061	47,6080	67,2864
Mensal	GPM-IMERG	0,7086	7,2099	7,2099	38,2422	53,3005

Tabela 03 - Desempenho médio dos produtos de precipitação nas escalas diária e mensal.
Fonte: Autores (2026).

Na resolução diária, os três produtos registraram baixos valores de R^2, variando entre 0,1937 e 0,2175, revelando limitações na representação da variabilidade da precipitação nessa escala. O GPM-IMERG demonstrou a maior associação com os dados observados, com R^2 de 0,2175, enquanto o ERA5-Land obteve os menores erros, com MAE de 5,7085 mm e RMSE de

13,2308 mm. Em relação ao viés, CHIRPS e ERA5-Land evidenciaram tendência de subestimativa, com MBE de -0,1063 mm e -0,5586 mm, respectivamente, ao passo que o GPM-IMERG registrou leve superestimativa, com MBE de 0,2394 mm.

Na agregação mensal, observou-se melhora expressiva no ajuste dos produtos. O GPM-IMERG apresentou o maior R^2, com 0,7086, e o menor RMSE, com 53,3005 mm. O CHIRPS, por sua vez, apresentou o menor |MBE| e o menor MAE, com 7,0234 mm e 37,4396 mm, respectivamente, indicando melhor desempenho em termos de viés absoluto e erro médio absoluto. Já o ERA5-Land registrou o menor R^2, com 0,5681, e os maiores erros nessa resolução, com MAE de 47,6080 mm e RMSE de 67,2864 mm, além de tendência de subestimativa, com MBE de -16,9061 mm. De forma geral, nenhum produto se sobressaiu em todos os indicadores, sendo sua aplicação mais adequada quando considerados conjuntamente a escala temporal, o tipo de métrica e o objetivo do estudo.

Escala	Produto	R^2	|MBE|	MAE	RMSE
Diária	CHIRPS	3	1	2	2
Diária	ERA5-Land	2	3	1	1
Diária	GPM-IMERG	1	2	3	3
Mensal	CHIRPS	2	1	1	2
Mensal	ERA5-Land	3	3	3	3
Mensal	GPM-IMERG	1	2	2	1

Figura 02: Ranking do desempenho médio dos produtos CHIRPS, ERA5-Land e GPM-IMERG nas escalas diária e mensal. 1 = melhor desempenho, 2 = desempenho intermediário e 3 = pior desempenho.
Fonte: Autores (2026).

A Figura 02 evidencia que nenhum produto foi superior em todos os indicadores e escalas. Na resolução diária, o GPM-IMERG destacou-se na associação com os dados observados (maior R^2), o ERA5-Land obteve menores erros (MAE e RMSE) e o CHIRPS registrou o menor viés absoluto (|MBE|). Na escala mensal, CHIRPS e GPM-IMERG dividiram as melhores posições entre os indicadores avaliados, enquanto o ERA5-Land apresentou o pior desempenho relativo. Esses resultados reforçam que a escolha do produto deve considerar a escala temporal e o objetivo da aplicação.

A Figura 03 apresenta o regime anual médio regional da precipitação observada e estimada. O acumulado observado foi de 1693,26 mm. O ERA5-Land registrou o valor mais próximo, com 1624,43 mm, subestimando em 4,06%, seguido pelo CHIRPS, com 1771,43 mm, superestimando em 4,62%, e pelo GPM-IMERG, com 1890,69 mm, 11,66% acima do observado. Os três produtos reproduziram o padrão sazonal, com maiores acumulados em maio e outubro e menores valores principalmente entre fevereiro e agosto. O ERA5-Land tendeu a subestimar os meses mais úmidos, o GPM-IMERG apresentou superestimativas mais frequentes, e o CHIRPS mostrou comportamento intermediário com menor erro absoluto médio mensal.

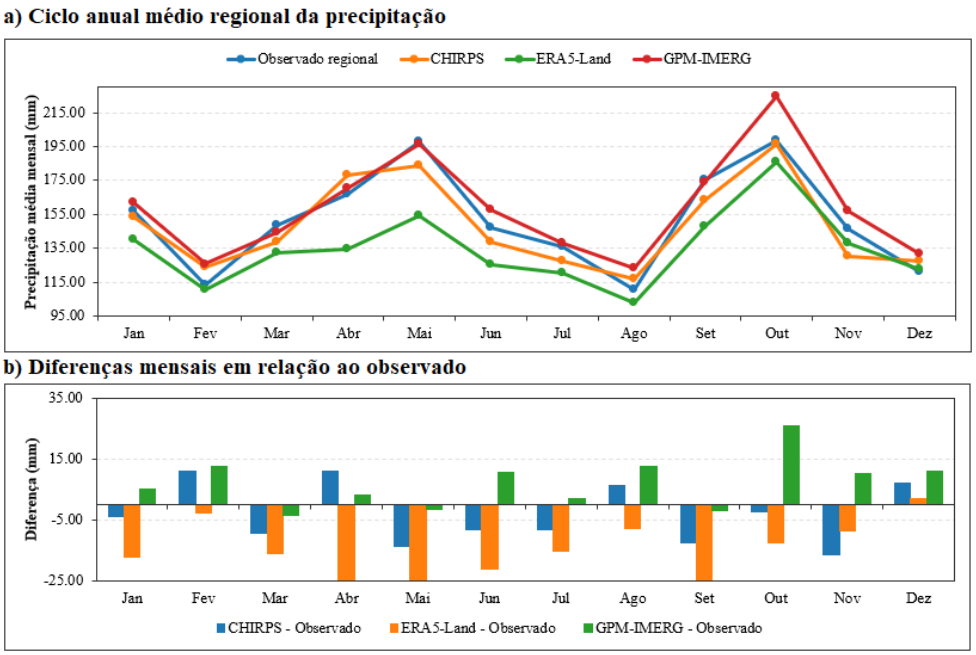


Figura 03: Regime anual médio regional da precipitação observada e estimada pelos produtos CHIRPS, ERA5-Land e GPM-IMERG, bem como as diferenças mensais entre cada produto e os dados observados.
Fonte: Autores (2026).

A Figura 04 mostra que os três produtos apresentaram maior concentração de pontos próximos à linha 1:1 para totais mensais baixos e intermediários, indicando melhor concordância nessas faixas de precipitação. Entretanto, à medida que os acumulados mensais aumentam, observa-se maior dispersão dos pontos, evidenciando maior dificuldade dos produtos em

representar eventos de maior magnitude. Visualmente, CHIRPS e GPM-IMERG apresentaram melhor aderência aos dados observados, com maior número de pontos distribuídos próximos à linha 1:1. O ERA5-Land, por sua vez, apresentou maior dispersão em relação aos valores observados, especialmente nos maiores acumulados mensais. Esse comportamento reforça os resultados apresentados na Tabela 03 na qual CHIRPS e GPM-IMERG demonstraram desempenho superior na escala mensal em relação ao ERA5-Land.

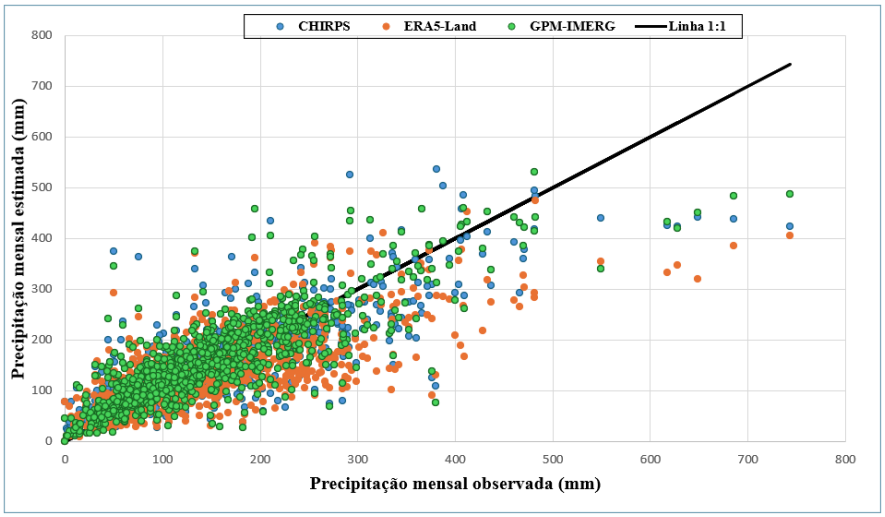


Figura 04: Relação entre a precipitação mensal observada e estimada pelos produtos CHIRPS, ERA5-Land e GPM-IMERG nas cinco estações analisadas.
Fonte: Autores (2026).

A Figura 05 apresenta o comportamento dos produtos durante o ano de 2024, marcado por acumulados excepcionais de precipitação. Os maiores valores regionais ocorreram em abril e maio, com destaque para maio, quando a precipitação observada atingiu 602,47 mm. Nesse mês, todos os produtos subestimaram o acumulado observado, com diferenças de -178,18 mm para o CHIRPS, -236,63 mm para o ERA5-Land e -151,30 mm para o GPM-IMERG. Apesar da subestimativa, o GPM-IMERG foi o produto que mais se aproximou do valor observado no mês mais extremo. Esses resultados indicam que, embora os produtos representem o aumento da precipitação em períodos chuvosos, ainda apresentam limitações na estimativa de eventos extremos, cuja acurácia depende da escala temporal, do contexto regional, do regime de chuva e da validação local (Conte; Tassi; Bayer, 2026).

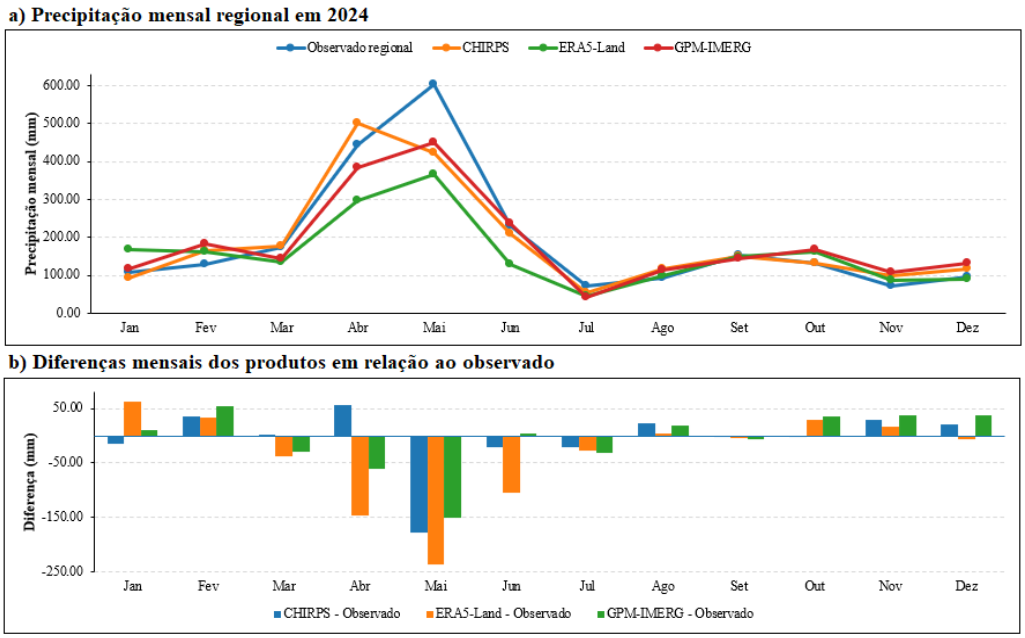


Figura 05: Desempenho dos produtos de precipitação durante o ano de 2024.
Fonte: Autores (2026).

Em síntese, os resultados demonstram que os produtos CHIRPS, ERA5-Land e GPM/IMERG podem complementar as redes pluviométricas convencionais na região da Bacia do Rio Soturno, sobretudo em análises mensais e na caracterização do

regime pluviométrico regional. No entanto, o desempenho variou conforme a escala temporal e a magnitude dos eventos, com maiores limitações na escala diária e na representação de acumulados extremos, como observado em maio de 2024. Além disso, por se tratar de produtos em grade comparados a dados pontuais de estações pluviométricas, diferenças locais de precipitação podem não ser totalmente captadas. Dessa forma, os resultados reforçam a necessidade de validação local antes da aplicação desses produtos em estudos hidrológicos e no monitoramento de secas e cheias no Rio Grande do Sul.

Comentários finais

Este estudo avaliou o desempenho de produtos gradeados de precipitação na região da Bacia Hidrográfica do Rio Soturno, utilizando dados observados de cinco estações pluviométricas como referência. Os resultados reforçam que essas bases podem complementar as redes convencionais de monitoramento, sobretudo em regiões com baixa densidade de estações, mas sua aplicação deve ser precedida de validação local, considerando as limitações associadas à escala temporal, à representatividade espacial e à independência dos dados de referência.

De modo geral, o desempenho foi superior na escala mensal em comparação à escala diária, indicando que a agregação temporal reduz parte das incertezas associadas à variabilidade da precipitação. Entre os produtos avaliados, o CHIRPS apresentou menor viés absoluto e menor erro médio absoluto mensal; o GPM-IMERG destacou-se pela maior associação na escala diária e mensal, pelo menor RMSE mensal e pela melhor aproximação no mês extremo de maio de 2024; enquanto o ERA5-Land apresentou o acumulado anual médio mais próximo ao observado, embora com limitações em algumas métricas de erro.

Apesar do potencial de uso, os resultados evidenciaram dificuldades na representação da precipitação diária e de eventos extremos de maior magnitude, além das diferenças esperadas entre estimativas em grade e observações pontuais. Assim, conclui-se que esses produtos podem apoiar estudos hidrológicos na região central do Rio Grande do Sul, desde que sua escolha considere o objetivo da aplicação e as incertezas envolvidas. Estudos futuros devem aprofundar a validação por estação, a análise sazonal, a avaliação de outros eventos extremos e a comparação entre extração pontual e média espacial na bacia.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) e ao grupo de pesquisa em Modelagem Hidroambiental e Ecotecnologias pelo apoio prestado.

Referências Bibliográficas

ACHARYA, S. C. *et al.* An evaluation of daily precipitation from a regional atmospheric reanalysis over Australia. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 8, p. 3387–3403, 19 ago. 2019.

AFONSO, J. M. de S. *et al.* Precipitation diurnal cycle assessment of satellite-based estimates over Brazil. **Remote Sensing**, v. 12, n. 14, 1 jul. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **As enchentes no Rio Grande do Sul:** evento climático extremo e lições para o futuro. Brasília: ANA, 2025. p. 57.

ARAGHI, A. *et al.* Investigation of satellite-related precipitation products for modeling of rainfed wheat production systems. **Agricultural Water Management**, v. 258, p. 107222, 1 dez. 2021.

CECCHERINI, G. *et al.* High-resolution precipitation datasets in South America and West Africa based on satellite-derived rainfall, enhanced vegetation index and digital elevation model. **Remote Sensing**, v. 7, n. 5, p. 6454–6488, 2015.

CERÓN, W. L. *et al.* A principal component analysis approach to assess CHIRPS precipitation dataset for the study of climate variability of the La Plata Basin, Southern South America. **Natural Hazards**, v. 103, n. 1, p. 767–783, 1 ago. 2020.

CONTE, L. C.; TASSI, R.; BAYER, D. M. Satellite-Based Rainfall Datasets: A Global Systematic Review of Applications, Accuracy, and Research Gaps. IEEE Access, v. 14, p. 29539–29565, 26 fev. 2026. DOI: 10.1109/ACCESS.2026.3667060.

DE FREITAS, C. M.; BARCELLOS, C. Disaster in Rio Grande do Sul, Brazil: climate crisis, Brazilian Unified National Health System response, and challenges of the new times. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 40, n. 11, 2024.

FERNANDES, V. R. *et al.* SECAS E OS IMPACTOS NA REGIÃO SUL DO BRASIL. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, 2021.

FUNK, C. *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, 8 dez. 2015.

HAFIZI, H.; SORMAN, A. A. Assessment of 13 Gridded Precipitation Datasets for Hydrological Modeling in a Mountainous

Basin. **Atmosphere**, v. 13, n. 1, 1 jan. 2022.

HINGE, G. *et al.* Hydrologic utility of satellite precipitation products in flood prediction: A meta-data analysis and lessons learnt. **Journal of Hydrology**, v. 612, p. 128103, 1 set. 2022.

HUFFMAN, G. J. *et al.* Integrated multi-satellite retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission (IMERG). In: LEVIZZANI, V. *et al.* (eds.). **Satellite precipitation measurement.** Cham: Springer, 2020. (Advances in Global Change Research, v. 67).

LIU, J. *et al.* Evaluation of six satellite-based precipitation products and their ability for capturing characteristics of extreme precipitation events over a climate transition area in China. **Remote Sensing**, v. 11, n. 12, 1 jun. 2019.

MORIASI, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MUÑOZ-SABATER, J. *et al*. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. **Earth System Science Data**, v. 13, p. 4349–4383, 2021.

NIED, A. H. *et al.* EXTREME MAXIMUM RAINFALL FROM 1912 TO 2024 IN SANTA MARIA, STATE OF RIO GRANDE DO SUL. **IRRIGA**, v. 29, p. 43–55, 26 jul. 2024.

REBOITA, M. S. *et al.* A Multi-Scale Analysis of the Extreme Precipitation in Southern Brazil in April/May 2024. **Atmosphere**, v. 15, n. 9, 1 set. 2024.

RODGERS, J. L.; NICEWANDER, W. A. Thirteen ways to look at the correlation coefficient. **The American Statistician**, v. 42, n. 1, p. 59–66, 1988.

SADEGHI, M. *et al.* PERSIANN-CCS-CDR, a 3-hourly 0.04° global precipitation climate data record for heavy precipitation studies. **Scientific Data**, v. 8, n. 1, 1 dez. 2021.

SATGÉ, F. *et al.* Consistency of satellite-based precipitation products in space and over time compared with gauge observations and snow- hydrological modelling in the Lake Titicaca region. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 1, p. 595–619, 1 fev. 2019.

SHEN, Y. *et al.* A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China. **Journal of Geophysical Research**, v. 119, n. 6, p. 3063–3075, 27 mar. 2014.

SUN, Q. *et al.* A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons. **Reviews of Geophysics**, v. 56, n. 1, p. 79–107, 1 mar. 2018.

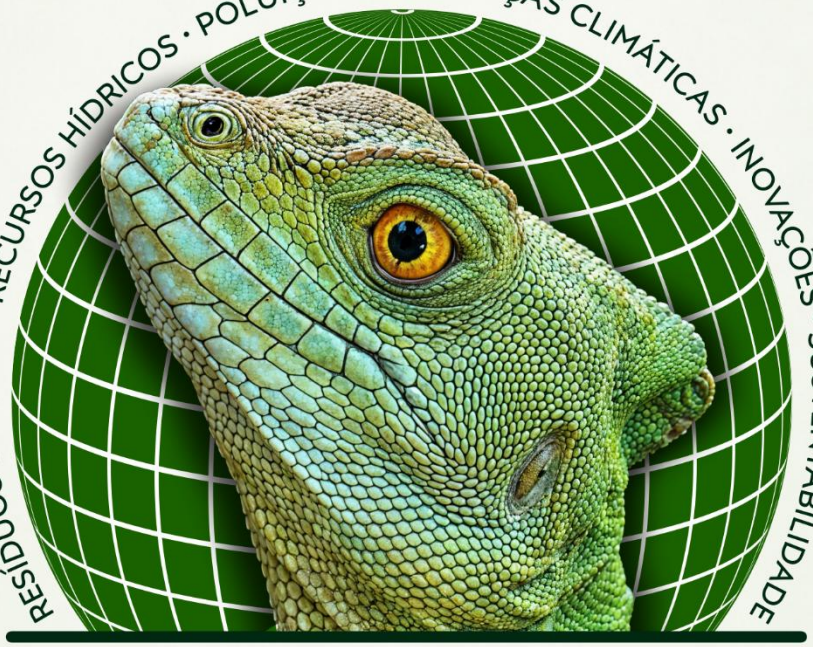
WANG, Z.; ZHONG, R.; LAI, C. Evaluation and hydrologic validation of TMPA satellite precipitation product downstream of the Pearl River Basin, China. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 23, p. 4169–4182, 15 nov. 2017.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Guide to meteorological instruments and methods of observation. **WMO Geneva - Switzerland**, p. 681, 2008.

ZHONG, R. *et al.* Drought monitoring utility of satellite-based precipitation products across mainland China. **Journal of Hydrology**, v. 568, p. 343–359, 1 jan. 2019.

ÁREA TEMÁTICA 11

GOVERNANÇA CLIMÁTICA E PARTICIPAÇÃO SOCIAL



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

PERCEPÇÃO DA COMUNIDADE COMERCIAL SOBRE A EFETIVIDADE DE MEDIDAS ESTRUTURANTES NA MITIGAÇÃO DE INUNDAÇÕES URBANAS

1 Keithy Juliane de Oliveira, 2 Leonardo Rios, 3 Maria Lúcia Ribeiro

1 Universidade de Araraquara (UNIARA), e-mail: keithy.oliveira@uniara.edu.br; 2 Universidade de Araraquara (UNIARA), e-mail: leonardo.rios@uniara.edu.br; 3 Universidade de Araraquara (UNIARA), e-mail: mlribeiro@uniara.edu.br

Palavras-chave: Inundações urbanas; Drenagem sustentável; Resiliência comercial.

Resumo

As inundações urbanas constituem um dos desafios mais críticos para a sustentabilidade das cidades brasileiras, sobretudo em bacias hidrográficas densamente urbanizadas. O objetivo deste estudo foi verificar a percepção da comunidade comercial sobre a efetividade das medidas estruturantes implementadas na Bacia do Córrego do Gregório, em São Carlos (SP), para a mitigação dos riscos de inundações na região do Mercado Municipal. A pesquisa adotou uma abordagem mista, combinando levantamento histórico-documental de eventos extremos entre 2013 à 2024 com a aplicação de questionários estruturados a 35 comerciantes locais, fundamentada no modelo DPSIR (Drivers-Pressures-State-Impact-Response). Os resultados indicaram que, apesar das obras de canalização realizadas a partir da década de 1970 e de intervenções pontuais subsequentes, a infraestrutura cinza demonstrou-se insuficiente para conter o volume de escoamento superficial gerado por chuvas intensas. A análise evidenciou que 82,9% dos comerciantes consideram a infraestrutura de drenagem inadequada, 68,6% avaliam que as intervenções estruturais não reduziram os riscos e 100% reconhecem a vulnerabilidade da região central. Conclui-se que a mitigação efetiva das inundações na área de estudo demanda a integração de soluções baseadas na natureza ao planejamento urbano, aliada a uma governança climática participativa que fortaleça a resiliência da comunidade comercial.

Introdução

O crescimento urbano desordenado, caracterizado pela rápida expansão das áreas impermeabilizadas e pela ocupação de fundos de vale, constitui um dos principais vetores para o agravamento das inundações em cidades brasileiras. A substituição da cobertura vegetal natural por superfícies impermeáveis altera drasticamente o ciclo hidrológico local, reduzindo a capacidade de infiltração do solo e aumentando exponencialmente o volume e a velocidade do escoamento superficial (Vicente, 2023).

Nesse contexto, a Bacia do Córrego do Gregório, localizada no município de São Carlos (SP), representa um caso emblemático de vulnerabilidade socioambiental, onde o adensamento construtivo histórico resultou em episódios recorrentes de alagamentos que afetam severamente a dinâmica socioeconômica da região central, em especial o entorno do Mercado Municipal (Marotti, Neves e Macera, 2014).

Historicamente, a resposta do poder público às inundações urbanas tem se concentrado na implementação de medidas estruturantes convencionais, também denominadas infraestrutura cinza, que incluem a canalização de córregos, retificação de leitos e construção de galerias pluviais. Embora essas intervenções busquem acelerar o escoamento das águas para jusante, estudos recentes demonstram que tais abordagens são frequentemente insuficientes para lidar com eventos climáticos extremos, transferindo o problema para outras áreas da bacia e degradando os ecossistemas aquáticos (Thorne et al., 2018).

A literatura científica aponta para a necessidade de uma mudança de paradigma na gestão de águas urbanas, enfatizando a adoção de Sistemas de Drenagem Sustentável e Infraestrutura Verde, que atuam na retenção, detenção e infiltração da água na fonte (Liu, Chen e Peng, 2014; Green et al., 2021; Rodrigues, 2025).

Apesar do crescente reconhecimento dos benefícios da infraestrutura verde-azul na mitigação de inundações, ainda há uma lacuna significativa na avaliação da efetividade das medidas estruturantes existentes sob a ótica da comunidade diretamente impactada. A percepção de risco e a capacidade adaptativa dos atores locais são elementos fundamentais para a construção da resiliência urbana, influenciando a aceitação e o sucesso de novas intervenções (Fonseca et al., 2023).

No setor comercial, as inundações não apenas causam danos materiais diretos, mas também provocam a interrupção das atividades, gerando prejuízos econômicos em cascata que ameaçam a sustentabilidade dos negócios a longo prazo (Abreu, 2019). Diante dessa problemática, o presente artigo tem como objetivo verificar a percepção da comunidade comercial sobre a eficácia das medidas estruturantes no controle dos riscos de inundações na Bacia do Córrego do Gregório, na região do Mercado Municipal de São Carlos-SP.

Material e Métodos

A Bacia possui área de aproximadamente 18,53 km², com fator de forma de 0,23 (bacia alongada), índice de compacidade de 1,456 (formato elíptico com tendência mediana a picos de cheia) e declividade média do canal principal de 0,0242 m/m (Esteves, 2003). A precipitação média anual no município é de aproximadamente 1.361,6 mm, concentrada entre outubro e março, com eventos extremos que superam 150 mm em poucas horas. O desenho metodológico foi estruturado em duas etapas complementares e integradas por meio do modelo DPSIR (Drivers-Pressures-State-Impact-Response), adaptado para o contexto de inundações urbanas, conforme sintetizado na Figura 01.



Figura 01: Desenho metodológico da pesquisa.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A primeira etapa consistiu no diagnóstico físico-hidrológico e levantamento histórico-documental das medidas estruturantes. Realizou-se uma revisão sistemática de documentos técnicos, relatórios da Defesa Civil, planos diretores de drenagem e registros jornalísticos abrangendo o período de 2013 à 2024. As fontes consultadas incluíram bases cartográficas do Instituto Brasileiro

de Geografia e Estatísticae (IBGE) e do Institutode Pesquisas Tecnológicas (IPT), relatórios operacionais do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), registros do Arquivo Público e Histórico de São Carlos e notícias de portais jornalísticos locais. O objetivo foi mapear a evolução da urbanização na Bacia, identificar as principais obras de infraestrutura cinza (canalizações, galerias) implementadas ao longo das décadas e catalogar a frequência e magnitude dos eventos de inundação. A análise documental permitiu estabelecer uma correlação histórica entre as intervenções estruturais e a persistência dos alagamentos, fornecendo a base técnica para confrontar com a percepção da comunidade comercial.

A segunda etapa compreendeu uma pesquisa de campo (survey) direcionada aos comerciantes localizados nas áreas de risco de inundação da Bacia, aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade de Araraquara (CAAE 87237025.5.0000.5383, Parecer nº 7.682.809). A amostra foi selecionada por conveniência dentro do quadrante de maior vulnerabilidade, definido pelo mapeamento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2015), contemplando exclusivamente proprietários com pelo menos dois anos de operação no local e que vivenciaram ao menos um evento de cheia. Foram distribuídos 135 questionários no período de julho a agosto de 2025, obtendo-se 35 devolutivas completas de estabelecimentos situados em vias historicamente afetadas, como a Rua Episcopal (9 respondentes), Rua Nove de Julho (7), Rua José Bonifácio (5), Rua Jesuíno de Arruda (5) e o entorno da Praça do Mercado.

O instrumento de coleta foi um questionário estruturado composto por 09 questões fechadas, organizadas em 05 categorias: Força motriz (1 questão), Pressão (2 questões), Estado (2 questões), Impacto (2 questões), Resposta (2 questões), componentes do modelo DPSIR , utilizando escala Likert de cinco pontos. O questionário foi desenhado para avaliar: a percepção sobre as causas das inundações; os impactos econômicos sofridos; a avaliação da eficácia das medidas estruturantes e das ações do poder público. Os dados quantitativos foram submetidos à análise estatística descritiva e a interpretação dos resultados foi fundamentada na matriz de avaliação de resiliência baseada no modelo DPSIR, permitindo uma compreensão sistêmica das forças motrizes, pressões, estado, impactos e respostas institucionais.

Resultados e Discussão

A análise histórica revelou que a Bacia do Córrego do Gregório sofreu um intenso processo de impermeabilização ao longo do século XX, acompanhado por intervenções estruturais focadas na rápida evacuação das águas pluviais. As obras de

canalização realizadas a partir da década de 1970, embora tenham mitigado problemas sanitários imediatos, não foram acompanhadas por medidas de retenção a montante.

O levantamento documental, baseado em registros jornalísticos sistematizados por Mendes e Mendiondo (2007), indicou que no período de 1940 a 1970 foram identificadas 10 notícias referentes a chuvas específicas, das quais 7 resultaram em inundações. Entre 1970 e 1988, todas as 5 chuvas registradas geraram inundações, evidenciando a intensificação dos eventos extremos mesmo após as primeiras canalizações. O Quadro 01 apresenta os eventos mais severos registrados entre 2013 e 2024, demonstrando a persistência do problema.

Data	Precipitação (mm)	Duração (min)
22/10/2013	105	140
23/11/2015	58	20
02/01/2020	75,5	70
12/01/2020	167,8	180
26/11/2020	138	70
27/10/2021	150,7	70
29/12/2022	235	-
07/02/2024	80	120

Quadro 01: Eventos críticos de inundação na Bacia do Córrego do Gregório (2013-2024)
Fonte: Adaptado de Vicente (2023) e Defesa Civil de São Carlos (2024)

Os dados evidenciam que eventos com precipitação superior a 100 mm tornaram-se mais frequentes na última década. O episódio de 29 de dezembro de 2022, com 235 mm em um único dia, foi classificado pelo Cemaden como a maior chuva do país naquele período, provocando alagamentos generalizados e destruição de bens públicos e privados, levando à decretação de situação de emergência no município.

Em fevereiro de 2024, uma tempestade severa acumulou 80 mm, dos quais 70 mm em apenas 15 minutos, provocando o transbordamento do Córrego do Gregório, arrasto de veículos e inundação de áreas comerciais. Esses registros demonstram que a infraestrutura cinza existente é incapaz de absorver os volumes gerados por eventos de alta intensidade e curta duração,

corroborando os achados de Aronica e Lanza (2005), que demonstram como sistemas de drenagem convencionais tornam-se localmente ineficientes quando submetidos a cargas superiores às de projeto.

Os resultados confirmaram a percepção de ineficácia das medidas estruturantes. O Quadro 2 sintetiza os principais indicadores de percepção da comunidade comercial, organizados segundo as dimensões do modelo DPSIR.

Indicador (dimensão DPSIR)	Concordância (%)	Discordância (%)
Crescimento populacional agrava risco (D)	57,1	34,3
Impermeabilização do solo intensifica cheias (P)	74,3	17,1
Desmatamento e ocupação irregular (P)	94,3	5,7
Infraestrutura de drenagem adequada (S)	2,9	82,9
Infraestrutura urbana mitiga danos (S)	0,0	85,7
Prejuízos econômicos consideráveis (I)	88,6	0,0
Frequência ameaça sustentabilidade (I)	85,7	5,7
Ações do poder público eficazes (R)	17,1	71,4
Intervenções estruturais reduziram riscos (R)	14,3	68,6

Quadro 02: Percepção dos comerciantes sobre fatores de risco e respostas institucionais (n=35).
Fonte: Resultados da pesquisa de campo (2024). D=Drivers; P=Pressures; S=State; I=Impact; R=Response

Essa análise revela um padrão consistente de insatisfação com as condições estruturais e institucionais. Na dimensão das forças motrizes (Drivers), 57,1% dos comerciantes associaram o crescimento populacional ao aumento do risco, enquanto 94,3% discordaram de que a expansão urbana tenha sido planejada para minimizar riscos.

Na dimensão das pressões (Pressures), a impermeabilização do solo (74,3%) e o desmatamento das margens (94,3%) foram identificados como fatores agravantes, indicando que a comunidade comercial possui compreensão consolidada sobre os processos que intensificam o escoamento superficial. Na dimensão do estado (State), a avaliação negativa da infraestrutura de drenagem (82,9% de discordância) e da infraestrutura urbana (85,7%) evidencia que o sistema existente é percebido como incapaz de responder aos eventos pluviais intensos. Esses resultados alinham-se aos achados de Abreu (2019), que quantificou os prejuízos econômicos derivados de inundações na mesma área de estudo e demonstrou que os prejuízos indiretos podem subdimensionar o impacto total sofrido pelos comerciantes em até 60%.

No que tange aos impactos econômicos, 88,6% dos respondentes relataram que a interrupção das atividades comerciais gera impactos econômicos consideráveis, e 85,7% consideram que a frequência das enchentes ameaça a sustentabilidade de seus negócios a longo prazo. A totalidade dos entrevistados (100%) reconheceu a vulnerabilidade da região central às inundações, sendo que 68,6% concordaram totalmente com essa afirmação. Apesar do alto risco, apenas 5,7% dos comerciantes declararam possuir seguro contra enchentes e 51,4% não dispõem de qualquer plano de contingência, evidenciando uma vulnerabilidade estrutural do comércio local que transcende a dimensão física e alcança a esfera da gestão empresarial. Paradoxalmente, 85,7% dos comerciantes declararam intenção de permanecer na região, o que revela forte enraizamento socioeconômico e dependência da localização atual, perpetuando a exposição ao risco.

A avaliação das respostas institucionais revelou um alto grau de insatisfação. Para 68,6% dos entrevistados, as intervenções estruturais realizadas não reduziram os riscos de inundações, e 71,4% discordam que as ações do poder público tenham sido eficazes. Adicionalmente, 71,4% dos comerciantes consideram insuficientes os investimentos em infraestrutura verde e azul, e 77,1% não reconhecem a existência de iniciativas comunitárias de mitigação. Esses resultados convergem com a análise de Fava et al. (2022), que avaliaram a resiliência dinâmica da Bacia do Gregório e concluíram que a implementação de técnicas de baixo impacto (LID) poderia aumentar significativamente a capacidade de resposta do sistema de drenagem, frente a cenários de mudanças climáticas. Autores como Liu, Chen e Peng (2014) e Maragno et al. (2018) enfatizam que a mitigação efetiva de inundações urbanas requer a implementação integrada de infraestrutura verde, como jardins de chuva, pavimentos permeáveis e bacias de detenção, que atuam na redução do volume e do pico de escoamento.

Um aspecto relevante dos resultados refere-se à disposição dos comerciantes para a governança participativa. A maioria expressiva (77,1%) aceitou a governança participativa como estratégia para mitigação de riscos, sendo que nenhum respondente rejeitou o modelo. Esse dado indica um potencial inexplorado para o engajamento da sociedade civil na formulação e monitoramento de políticas de adaptação climática em nível local.

A transição para um modelo de gestão de riscos mais eficaz exige a superação de barreiras técnicas e institucionais para a adoção de Sistemas de Drenagem Sustentável, conforme preconizado por Mattos et al. (2021), que demonstraram, por meio de modelagem hidrológica em Bacia tropical, que medidas estruturais e não estruturais de baixo impacto obtiveram eficiência equivalente na redução de picos de vazão. Green et al. (2021) reforçam que a infraestrutura verde deve atuar sinergicamente com

a infraestrutura cinza existente para proporcionar uma solução holística que entregue múltiplos cobenefícios ao ambiente e à sociedade.

Considerações Finais

O estudo demonstrou que as medidas estruturantes convencionais implementadas na Bacia do Córrego do Gregório têm se mostrado insuficientes para mitigar os riscos de inundações na região do Mercado Municipal de São Carlos. A contínua impermeabilização do solo, aliada ao aumento da intensidade dos eventos pluviométricos, sobrecarregou a infraestrutura cinza existente, resultando em prejuízos econômicos recorrentes e ameaçando a sustentabilidade do setor comercial local. A percepção crítica dos comerciantes, expressa por indicadores como a avaliação de 82,9% de inadequação da drenagem e 68,6% de ineficácia das intervenções estruturais, evidencia a falência do modelo reativo de gestão de águas urbanas e a urgência de abordagens preventivas.

A análise aponta para a necessidade imperativa de integrar soluções baseadas na natureza e infraestrutura verde-azul ao planejamento urbano do município. A adoção de Sistemas de Drenagem Sustentável a montante da bacia apresenta-se como a alternativa mais viável para reduzir o volume e o pico de escoamento superficial, aliviando a pressão sobre as áreas de fundo de vale. Ademais, a efetividade dessas intervenções depende de uma governança climática participativa, que inclua a comunidade comercial nos processos de tomada de decisão e no fortalecimento da resiliência local. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de modelagens hidrológicas quantitativas para simular cenários de implementação de infraestrutura verde na Bacia do Gregório, bem como a investigação de mecanismos de financiamento e incentivos fiscais que viabilizem a adoção de medidas de adaptação em propriedades comerciais privadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Territorial e Meio Ambiente da Universidade de Araraquara (UNIARA) pelo suporte acadêmico e à comunidade comercial de São Carlos pela disponibilidade em participar da pesquisa.

Agradecimento à CAPES por concessão de Bolsa de Doutorado.

Referências Bibliográficas

ABREU, F.G. **Quantificação dos prejuízos econômicos à atividade comercial derivados de inundações urbanas**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em:

https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/USP_a2902a2b284878cfb57655b3f93f9fcd. Acesso em 20 de mar. 2026

ARONICA, G.T.; LANZA, L.G. Drainage efficiency in urban areas: a case study. **Hydrological Processes**, v. 19, n. 5, p. 1105-1119, 2005.

ESTEVES, Rafael Lucio. **Estratégias Metodológicas da Bacia Escola para o Gerenciamento Ambiental da Drenagem Urbana.** 2003. 61 f. Trabalho de conclusão de curso (Bolsista de Iniciação Científica) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003.

FAVA, M.C.; MACEDO, M.B.; BUARQUE, A.C.S.; SARAIVA, A.M.; MENDIONDO, E.M. Linking Urban Floods to

Citizen Science and Low Impact Development in Poorly Gauged Basins under Climate Changes for Dynamic Resilience Evaluation. **Water**, v. 14, n. 9, p. 1467, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/9/1467> Acesso em 22 de mar. 2026

FONSECA, M.N; GARCIAS, C.M; SILVA, L.P. Avaliação dos fatores que influenciam na percepção de risco de inundação: uma revisão sistemática de pesquisas empíricas. **Confins – Revue franco-brésilienne de géographie**, n. 58, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4000/confins.50531> Acesso em 21 de mar. 2026

GREEN, D.; O'DONNELL, E.; JOHNSON, M.; SLATER, L.; THORNE, C.; ZHENG, S.; STIRLING, R.; CHAN, F.K.S.; LI,

L.; BOOTHROYD, R. Green infrastructure: The future of urban flood risk management? **WIREs Water**, v. 8, n. 6, e1560, 2021. Disponível em: <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wat2.1560> Acesso em 24 de mar. 2026

IPT. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapeamento de áreas de alto e muito alto risco a deslizamentos e inundações do Município de São Carlos, SP.** São Paulo: IPT, 2015. 146 p. (Relatório Técnico nº 144.443-205). Disponível em: https://tietejacare.com.br/wp-content/uploads/2024/07/Mapeamento-de-Areas-de-Alto-e-Muito-Alto-Risco-a-Deslizamentos-e-Inundacoes-Sao-Carlos-SP.pdf. Acesso em: 07 abr. 2026.

LIU, W.; CHEN, W.; PENG, C. Assessing the effectiveness of green infrastructures on urban flooding reduction: A community scale study. **Ecological Modelling**, v. 291, p. 6-14, 2014.

MARAGNO, D.; GAGLIO, M.; ROBBI, M.; APPIOTTI, F.; FANO, E. A. Fine-scale analysis of urban flooding reduction from green infrastructure: An ecosystem services approach for the management of water flows. **Ecological Modelling,** Elsevier, vol. 386(C), pages 1-10. 2018

MAROTTI, A.C.B.; SANTO, K.E.L.; MACERA, L.G.; NEVES, L.L.; GONÇALVES, J.C.; PUGLIESI, E. Levantamento histórico e relatos de inundações do córrego do Gregório na região central do município de São Carlos-SP. **Revista Eixo**, v. 3,n. 1, 27 jun, 2014.

MATTOS, T.S.; OLIVEIRA, P.T.S.; BRUNO, L.S.; VASCONCELOS, J.G.; LUCAS, M.C.; OLIVEIRA, N.D. Improvin urban flood resilience under climate change scenarios in a tropical watershed using low-impact development practices.**Journal of Hydrologic Engineering**, v. 26, n. 12, :05021031-1, 2021.

MENDES, H.C.; MENDIONDO, E.M. Histórico da expansão urbana e incidência de inundações: o caso da bacia do Gregório, São Carlos-SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 1, p. 17-27, 2007.

RODRIGUES, J. B. D. **Jardins de chuva como estratégia sustentável para a drenagem urbana**: estudo de caso na cidade de Ribeirão Preto-SP. 2025. 133 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Territorial e Meio Ambiente) – Universidade de Araraquara, Araraquara, 2025.

THORNE, C.R.; LAWSON, E.C.; OZAWA, C.; HAMLIN, S.L.; SMITH, L.A. Overcoming uncertainty and barriers to adoption of Blue-Green Infrastructure for urban flood risk management. **Journal of Flood Risk Management,** v. 11, n. S2, p. S960-S972, 2018.

VICENTE, A.P.Z. **Subsídios ao planejamento da infraestrutura verde na bacia hidrográfica do córrego do Gregório (São Carlos-SP)**. Repositório Institucional UFSCar. 2023. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/19241?locale-attribute=es. Acessado em 28 mar. 2024

ANÁLISE DOS IMPACTOS SOCIOECÔNOMICOS DA CRISE CLIMÁTICA E DOS DESAFIOS PARA A GOVERNANÇA CLIMÁTICA EM JOINVILLE/SC

1 Maria Clara Reinert Brittes, 2 Tatiana da Cunha Gomes Leitzke, 3 Therezinha Maria Novais de Oliveira, 4 Celso Voos, 5 Fernanda do Nascimento Stafford

1 Univille, e-mail: clara.brittes62@gmail.com; 2 Univille, e-mail: tatiana.cunha@univille.br; 3 Univille, e-mail: therezinha.novais@univille.br; 4 Univille, e-mail: celso.voos@univille.br; 5 Univille, e-mail: Fernanda.stafford@univille.br

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Eventos extremos; Vulnerabilidade socioeconômica

Resumo

As mudanças climáticas têm intensificado a ocorrência de eventos extremos, afetando de forma crescente o cotidiano das cidades e a vida das populações. No contexto urbano, esses fenômenos agravam vulnerabilidades preexistentes e impactam diretamente a qualidade de vida e o desenvolvimento econômico das cidades. Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo identificar e analisar os impactos socioeconômicos decorrentes da crise climática, além de avaliar os desafios da governança climática no município de Joinville, Santa Catarina. A pesquisa, de caráter exploratório e descritivo, baseou-se em dados secundários de órgãos oficiais, como Defesa Civil, IBGE e SINAN, e utilizou a matriz SWOT para interpretação dos resultados. Observou-se que os desastres hidrológicos, especialmente alagamentos e inundações, estão fortemente associados à urbanização desordenada e à insuficiência da drenagem urbana. No campo social, destaca-se o aumento da vulnerabilidade populacional e de doenças sensíveis ao clima, como dengue e leptospirose, intensificadas pela alta pluviosidade e fragilidade do saneamento básico. Do ponto de vista econômico, os impactos recaem sobre a infraestrutura pública e os setores produtivos, refletindo prejuízos materiais e redução da capacidade de recuperação local. Apesar de avanços pontuais em ações de adaptação, o município ainda carece de planejamento integrado e ações estruturais voltadas à resiliência climática. Conclui-se que o fortalecimento da governança ambiental e a adoção de soluções baseadas na natureza são essenciais para reduzir a vulnerabilidade socioeconômica e promover o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, em especial o ODS 13.

Introdução

As mudanças climáticas têm intensificado a ocorrência de eventos extremos, impactando significativamente diferentes regiões do planeta e afetando o sistema climático global (MONTEIRO et al., 2021). De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), eventos como ondas de calor, alterações nos regimes de precipitação, secas e ciclones têm se tornado mais frequentes e intensos, ampliando seus efeitos sobre ecossistemas e populações (IPCC, 2022).

Esses eventos geram impactos diretos sobre a sociedade, incluindo danos à infraestrutura urbana, perdas econômicas e riscos à saúde pública, especialmente em áreas já vulneráveis. Nesse contexto, políticas públicas de adaptação tornam-se fundamentais para a redução da vulnerabilidade socioambiental, exigindo atuação integrada entre diferentes esferas de governo e setores da sociedade (Barbi e Reis, 2021).

No Brasil, os impactos das mudanças climáticas já são observados em diferentes regiões, afetando centros urbanos de distintas características socioambientais. O município de Joinville/SC, por exemplo, possui histórico recorrente de adversidades climáticas, com destaque para inundações e deslizamentos (Mello e Koehntopp, 2017). Estudos indicam que, diante do avanço das mudanças climáticas, esses eventos tendem a se intensificar, ampliando impactos como enchentes, propagação de doenças e prejuízos socioeconômicos (Siebert, 2017).

Dessa forma, a análise dos impactos socioeconômicos associados à crise climática torna-se essencial para subsidiar ações de adaptação e fortalecer a resiliência urbana, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 13, voltado à ação contra a mudança global do clima (IPEA, 2019).

Assim, este estudo tem como objetivo analisar os impactos socioeconômicos decorrentes de eventos climáticos extremos no município de Joinville/SC, bem como discutir os desafios relacionados à governança climática e às estratégias de adaptação.

Material e Métodos

A pesquisa adotou abordagem exploratória e descritiva, com procedimentos qualiquantitativos, visando analisar os impactos socioeconômicos de eventos climáticos extremos no município de Joinville/SC. Foram utilizados dados secundários provenientes de órgãos oficiais, como Defesa Civil, IBGE, Sistema de Informação de Agravos de Notificação (SINAN) e Atlas Digital de Desastres no Brasil, além de documentos institucionais e literatura científica.

O município de Joinville, localizado no nordeste do estado de Santa Catarina, caracteriza-se como importante polo urbano e industrial, com elevada densidade populacional e significativa expansão urbana nas últimas décadas. Do ponto de vista físico-ambiental, apresenta relevo composto por áreas de planície costeira e encostas da Serra do Mar, além de elevada pluviosidade anual e influência da dinâmica marítima, aspectos considerados na análise dos eventos climáticos.

Os dados foram organizados em categorias relacionadas a eventos climáticos, impactos sociais, econômicos e políticas públicas. Para a identificação dos eventos, utilizou-se a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE),

considerando ocorrências de origem hidrológica, meteorológica e geológica, como alagamentos, enxurradas, inundações, vendavais e erosão.

A análise dos dados envolveu estatística descritiva e análise documental, com organização dos indicadores em séries históricas, permitindo identificar padrões, tendências e relações entre variáveis. Os indicadores foram organizados em séries históricas para avaliar a evolução dos eventos e seus impactos ao longo do tempo.

Como ferramenta de apoio à interpretação dos resultados, foi utilizada a matriz SWOT, possibilitando a identificação de forças, fraquezas, oportunidades e ameaças relacionadas à governança climática municipal, a partir da integração de dados quantitativos e qualitativos.

Resultados e Discussão

Os resultados indicam que os eventos climáticos registrados no município de Joinville são predominantemente de origem hidrológica, representando cerca de 77% dos desastres no período analisado (Figura 01). Esses eventos incluem principalmente alagamentos, inundações e enxurradas, evidenciando a influência das condições climáticas locais associadas às características físicas do município.

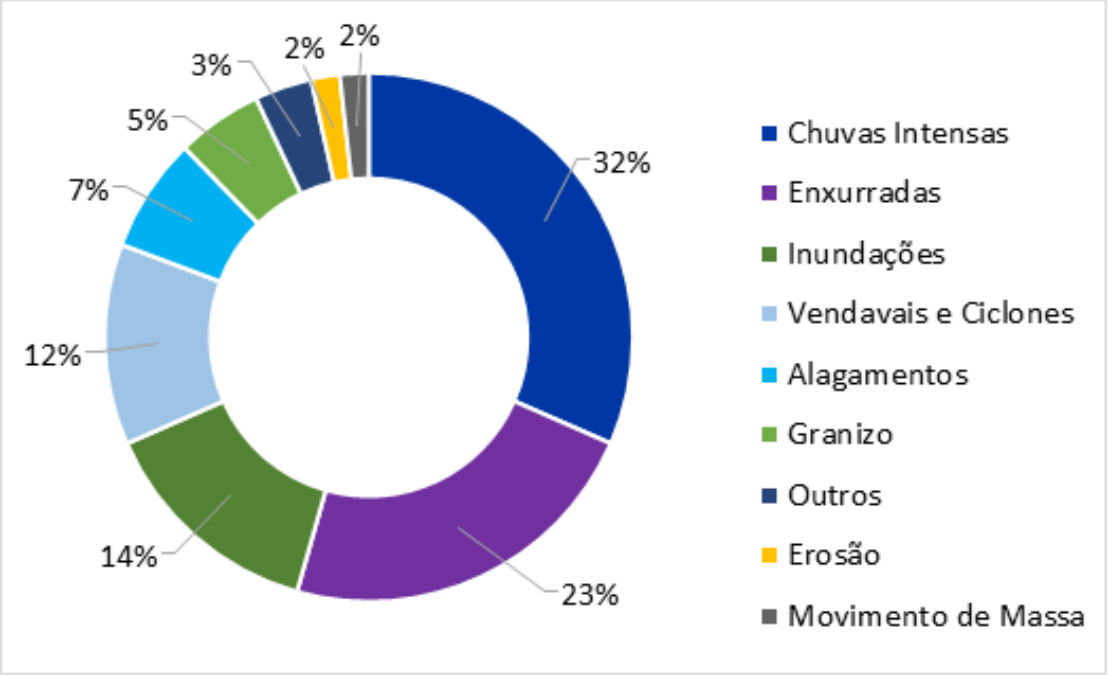


Figura 01: Classificação dos registros de desastres ocorridos em Joinville/SC.
Fonte: Atlas Digital de Desastres no Brasil (MDR, 2025)

A recorrência desses eventos está relacionada tanto a fatores naturais, como elevada pluviosidade, relevo de planície costeira e influência marítima, quanto a fatores antrópicos, como a expansão urbana, impermeabilização do solo e limitações da infraestrutura de drenagem. Essa combinação intensifica a frequência e a magnitude dos impactos observados.

Do ponto de vista social, observou-se aumento significativo do número de pessoas afetadas por eventos extremos. Entre 1991 e 2024, aproximadamente 90.770 pessoas foram diretamente impactadas pelos desastres registrados no município, com predominância das categorias de desalojados e desabrigados. Esse cenário está associado à natureza dos eventos que atingem a região, uma vez que as características físicas locais, como a presença de planícies costeiras com baixa variação altimétrica, favorecem a ocorrência de inundações, frequentemente resultando na entrada de água nas residências, danos às estruturas e interdições de moradias (Figura 2).

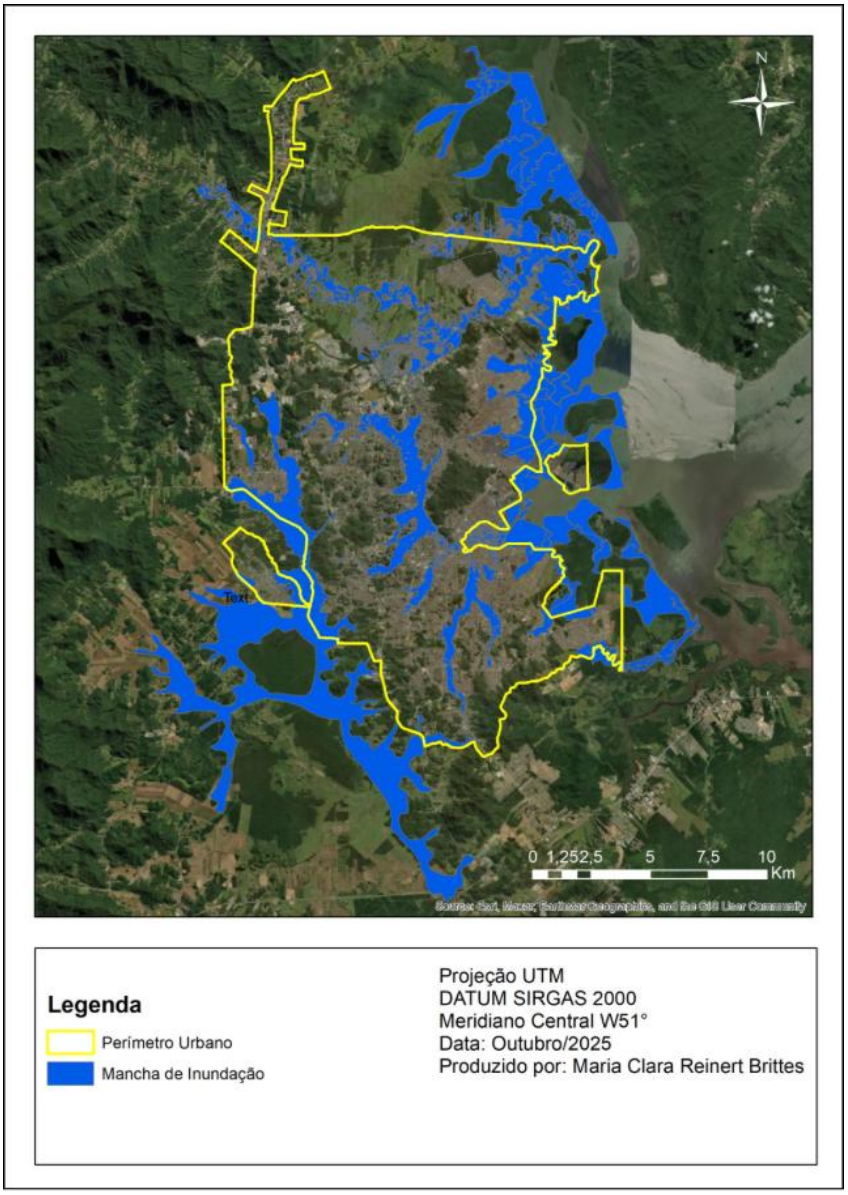


Figura 02: Mapa de sobreposição das áreas inundáveis na área urbana de Joinville/SC.
Fonte: Autor, 2025.

A ocupação de áreas suscetíveis a inundações em Joinville está diretamente relacionada ao avanço da urbanização sobre regiões de planície e margens de rios, o que intensifica a exposição da população a eventos hidrológicos (CPRM, 2018; IBGE, 2024). O crescimento urbano acelerado, sem o devido acompanhamento por medidas de planejamento e controle, contribui para o aumento do risco de inundações e da população exposta. Além disso, a vulnerabilidade não está associada apenas às características físicas dos eventos, como profundidade e extensão das áreas alagadas, mas também à densidade populacional nas áreas atingidas (Negri, 2025; Moura, Frenzel e Moura, 2019).

Esse cenário é agravado pelas limitações do sistema de drenagem urbana, frequentemente subdimensionado frente à intensificação das chuvas, o que favorece a ocorrência de alagamentos recorrentes e reforça a necessidade de adaptação da infraestrutura às condições futuras. Como resultado, observa-se aumento do número de desalojados e desabrigados ao longo dos anos, evidenciando a intensificação dos impactos associados aos eventos extremos. Entre 1991 e 2008, aproximadamente 30 mil pessoas foram afetadas, enquanto no período de 2009 a 2024 esse número ultrapassa 60 mil, indicando crescimento significativo da população exposta e impactada no município, o que reforça a interrelação entre a vulnerabilidade física do território e a vulnerabilidade social da população.

Sob a perspectiva ambiental e sanitária, os eventos climáticos extremos representam sérios riscos à saúde pública, especialmente devido à sua influência sobre as condições ambientais urbanas. Em Joinville, inundações e alagamentos recorrentes criam condições favoráveis à proliferação de doenças de veiculação hídrica, como leptospirose e diarreia infecciosa, além de contribuírem para o aumento dos casos de dengue, cuja incidência tende a crescer em períodos de maior precipitação. De acordo com dados do Sistema de Informação de Agravos de Notificação (SINAN), o número de casos de dengue apresentou aumento aproximado de 840% entre 2020 e 2024 (Figura 3).

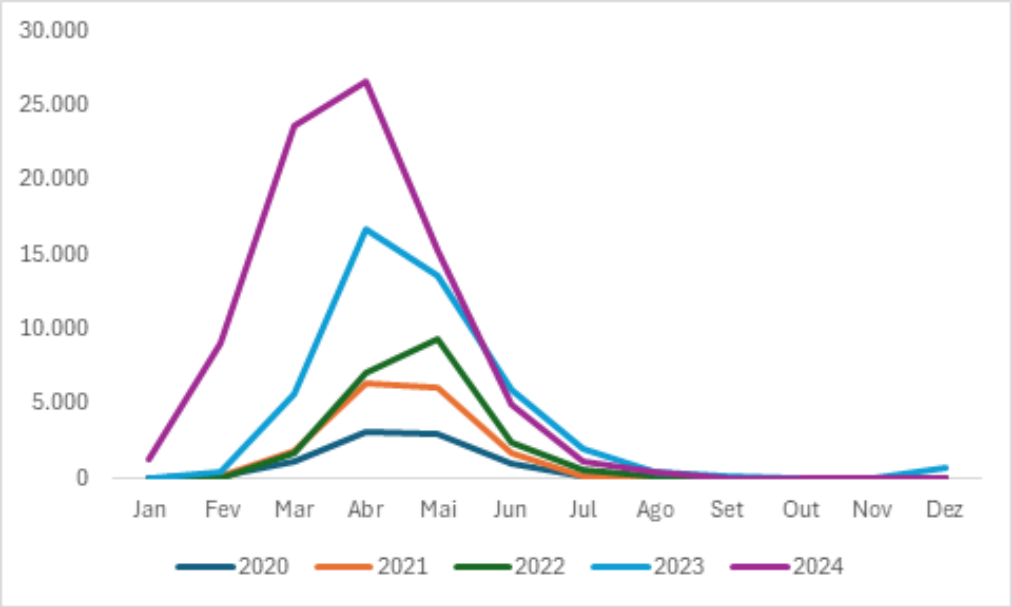


Figura 03: Número de casos de dengue nos anos de 2020 – 2024.
Fonte: Sistema de Informação de Agravos de Notificação (SINAN)

Observou-se crescimento expressivo de doenças sensíveis ao clima, diretamente associado à ocorrência de inundações e enchentes, que favorecem o acúmulo de água, a degradação das condições sanitárias e a proliferação de vetores. Esse aumento está relacionado a fatores como temperaturas elevadas, acúmulo de água em áreas urbanas e falhas na drenagem, que criam ambientes propícios à reprodução do mosquito vetor. Iniciativas como o projeto Wolbachia representam avanços no controle do vetor, porém não atuam sobre as causas estruturais do problema, relacionadas à organização do espaço urbano e à infraestrutura de saneamento.

Além disso, eventos de inundação contribuem para a disseminação de doenças de veiculação hídrica, como a leptospirose, e agravam quadros de doenças respiratórias, evidenciando a relação direta entre eventos climáticos extremos e o aumento dos riscos à saúde da população.

No aspecto econômico, os eventos climáticos extremos geram impactos significativos sobre a infraestrutura urbana e o setor produtivo do município, totalizando aproximadamente R$ 392 milhões em prejuízos.

No setor público, os maiores impactos foram observados nos sistemas de esgotamento sanitário e drenagem urbana, evidenciando a sobrecarga dessas infraestruturas durante períodos de chuva intensa e a limitação dos sistemas atuais frente à variabilidade climática. Também se destacam prejuízos relacionados aos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos, que demandam ações emergenciais de recuperação e manutenção (Muttil, Nasrin e Sharma, 2023). Além disso, durante e após os eventos extremos, verifica-se aumento da demanda por atendimento médico, internações e vigilância epidemiológica, o que pressiona os recursos municipais e dificulta o retorno às condições normais de funcionamento.

Em relação aos prejuízos privados, os impactos estão associados principalmente à interrupção de atividades econômicas, perdas materiais e danos a estabelecimentos comerciais e industriais. As inundações comprometem a operação de empresas, afetam a produtividade e geram prejuízos diretos ao setor produtivo local, especialmente considerando a relevância industrial do município.

De forma geral, os danos abrangem desde a deterioração de vias públicas, pontes, equipamentos urbanos e redes de saneamento até perdas produtivas e interrupções econômicas, comprometendo a mobilidade urbana e o funcionamento dos serviços essenciais. Esses impactos extrapolam os efeitos imediatos, gerando consequências indiretas, como o aumento dos gastos públicos com reconstrução da infraestrutura, saúde e assistência social.

Esse cenário evidencia a vulnerabilidade da infraestrutura urbana frente à intensificação dos eventos climáticos, reforçando a necessidade de investimentos em planejamento urbano, adaptação climática e soluções de drenagem mais eficientes.

Em relação às políticas públicas, observam-se iniciativas voltadas à adaptação climática e à melhoria da infraestrutura urbana no município. No entanto, os resultados indicam que essas ações ainda se encontram em estágios iniciais e apresentam limitações quanto à sua articulação e abrangência. O avanço da urbanização, muitas vezes dissociado de instrumentos efetivos de planejamento territorial, contribui para a ampliação da exposição da população aos riscos climáticos.

Além disso, verifica-se a ausência de um planejamento estruturado que contemple definição clara de metas, indicadores de monitoramento e orçamento específico para ações de adaptação climática. Essa lacuna dificulta a implementação de estratégias contínuas e eficazes, bem como a integração entre políticas setoriais, como planejamento urbano, gestão de riscos e desenvolvimento social.

Embora o município apresente avanços importantes, os resultados evidenciam a necessidade de fortalecimento institucional e de maior integração entre os instrumentos de gestão, de modo a consolidar uma abordagem mais estratégica e resiliente frente aos desafios impostos pela intensificação dos eventos climáticos.

A análise da governança climática, por meio da matriz SWOT (Figura 04), reforça esse cenário ao evidenciar que, apesar da capacidade institucional e da relevância econômica do município, persistem fragilidades relacionadas ao ordenamento territorial, à baixa integração entre setores e à ausência de políticas públicas plenamente articuladas. Essas limitações comprometem a efetividade das ações de adaptação e ampliam a vulnerabilidade frente aos eventos climáticos extremos.

Por outro lado, destacam-se oportunidades associadas à adoção de soluções baseadas na natureza, ao aprimoramento dos instrumentos de planejamento urbano e ao fortalecimento de políticas públicas voltadas à adaptação climática, indicando caminhos para o aumento da resiliência urbana e a construção de uma governança mais integrada e estratégica.

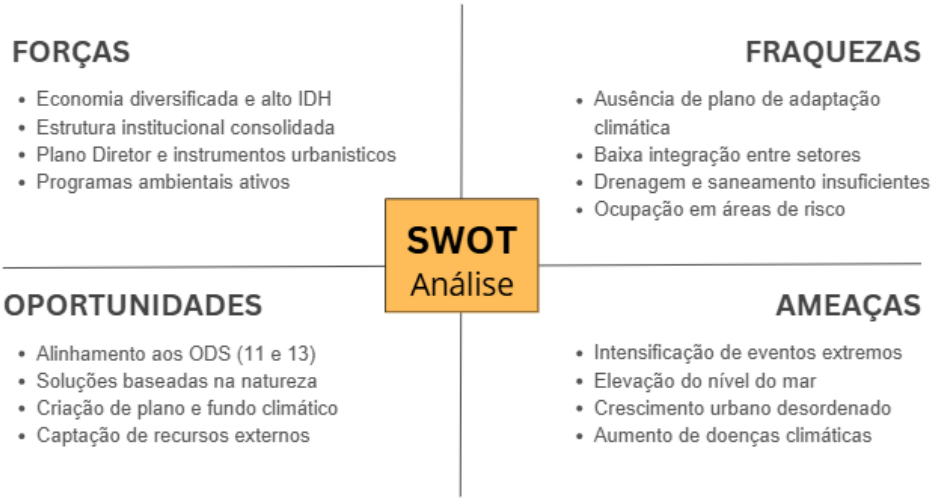


Figura 04: Matriz Swot da Governança Ambiental de Joinville/SC.
Fonte: Autor, 2025.

Considerações finais

O presente estudo analisou os principais impactos socioeconômicos da crise climática em Joinville/SC entre 1991 e 2024. Verificou-se a predominância de desastres hidrológicos, como alagamentos, enxurradas e inundações, associados à urbanização, impermeabilização do solo e limitações da drenagem urbana.

No campo social, observou-se aumento da vulnerabilidade da população, evidenciado pelo crescimento de desabrigados, desalojados e doenças sensíveis ao clima, como dengue e leptospirose. Na esfera econômica, os prejuízos somaram cerca de R$ 392 milhões, afetando a infraestrutura pública e o setor produtivo, além de gerar impactos indiretos sobre saúde e assistência social.

Em relação às políticas públicas, identificaram-se avanços institucionais, mas também limitações quanto à integração entre planejamento urbano, gestão de riscos e adaptação climática. A análise SWOT reforça a necessidade de estratégias mais estruturadas e integradas frente à intensificação dos eventos extremos.

Conclui-se que a crise climática em Joinville configura um desafio socioeconômico e de planejamento urbano, exigindo o fortalecimento da governança climática, a adoção de soluções baseadas na natureza e o alinhamento a metas de adaptação e resiliência urbana.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Univille – Universidade da Região de Joinville, pelo apoio recebido na realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

BARBI, Fabiani; REI, Fernando Cardozo Fernandes. Mudanças Climáticas e a Agenda de Adaptação nas Cidades Brasileiras. **Revista Catalana de Dret Ambiental**, v. 12, n. 1, 2021. Disponível em: https://raco.cat/index.php/rcda/article/view/393350.

BRAUN, Júlia; AUMOND, Jonas. Mangues, cidades e mudanças climáticas: a importância dos ecossistemas costeiros para as cidades de Itajaí e Joinville (SC) diante dos prognósticos da elevação do nível do mar. **Revista Geográfica de América Central**, n. 57, p. 67–86, 2016.

BRASIL. Ministério da Saúde. Boletim Epidemiológico: Doenças Sensíveis ao Clima. Brasília, 2025. ISSN: 2358-9450. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins/epidemiologicos.

BRASIL. Ministério da Saúde. Emergências climáticas. Brasília: Ministério da Saúde, [s.d.]. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/e/emergencias-climaticas.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). Atlas Digital de Desastres no Brasil. Brasília: MDR, 2024. Disponível em: https://atlasdigital.mdr.gov.br/paginas/graficos.xhtml.

CMSB - Conferência Municipal de Meio Ambiente e Saneamento Básico – Município de Joinville (SC). Emergências Climáticas: Acesso à Água e Esgotamento Sanitário – Diretrizes e Oportunidades para o Município de Joinville. Processo SEI n° 23.0.134014-1, 2023. Disponível em: https://www.joinville.sc.gov.br/eventos/1a-conferencia-municipal-de-meio-ambiente-e-saneamento-basico/?utm_source=chatgpt.com.

CAMPIOLI, Pâmela Fermino; VIEIRA, Celso Voos. Avaliação do risco a inundação na Bacia Hidrográfica do rio Cubatão do Norte, Joinville/SC. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 12, n. 01, p. 124-138, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.1.p124-138

DE SOUSA, Talita Miranda; MIRANDA, Luana Varela; NETO, Osires de Medeiros Melo; LOPES, Albaniza Maria da Silva; DINIZ, Maria Ingridy Lacerda; SILVA, Ingridy Minervina. An overview of urban drainage systems and their management in Brazil. **Seven Publicações**, Brasil. Disponível em: https://www.sevenpublicacoes.com.br/12345.

DIAS, Amanda Ribeiro Lutterback; OLIVEIRA, Antônio Krishnamurt Beleno de. Utilização da matriz SWOT na análise de problemas socioambientais da Baía de Guanabara e sua relevância para a defesa nacional: estudo de caso da vila residencial localizada na Ilha do Fundão. **Revista da Escola Superior de Guerra**, v. 39, n. 85, p. 9-37, jan.-abr. 2024. Disponível em: https://revista.esg.br/index.php/revistadaesg/article/view/1366/1101.

DUTRA, Rita de Cássia; SCHERER, Marinez Eymael Garcia. Danos e prejuízos econômicos associados aos desastres naturais na zona costeira de Santa Catarina/Sul do Brasil. **XIV Encontro Nacional de Pós- Graduação e Pesquisa em Geografia.** ISSN: 2175-8875.

FADEL, Amanda Wajnberg. Incorporação do risco de prejuízo no gerenciamento de medidas de controle de inundação. 2015. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/143924.

FIEMG. **Impactos Econômicos das Chuvas no Brasil**. Belo Horizonte: FIEMG, 2025.

FIOCRUZ. Método Wolbachia é expandido para Joinville (SC). Rio de Janeiro: Fiocruz, 2023. Disponível em: https://wolbachia.org.br.

FRANCISCO, Telvio Henrique da Silva; MENEZES, Osvaldo Vieira Costa; GUEDES, André Luiz Andrade; MAQUERA, Gladys; VIEIRA NETO, Dácio Costa; LONGO, Orlando César; CHINELLI, Christine Kulisz; SOARES, Carlos Alberto Pereira. The Main Challenges for Improving Urban Drainage Systems from the Perspective of Brazilian Professionals. **Infrastructures ,** v. 8, n. 1, p. 5, 2023. DOI: 10.3390/infrastructures8010005. Disponível em: https://www.mdpi.com/2412-3811/8/1/5

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades e Estados - Joinville (SC).** Brasília: IBGE, 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sc/joinville.html. Acesso em: 16 jun. 2025.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13: Ação contra a mudança global do clima.** Brasília: IPEA, 2019. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/ods/ods13_card.html.

IPCC; Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Relatório Síntese - Mudanças do Clima 2023. **Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação**. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc.

JOINVILLE. Plano Municipal de Contingência de Proteção e Defesa Civil**. Secretaria de Proteção Civil e Segurança Pública.** Joinville: Prefeitura Municipal de Joinville, 2022. Disponível em: https://www.joinville.sc.gov.br/publicacoes/plano-de-contingencia-de-protecao-e-defesa-civil/.

JOINVILLE. Prefeitura Municipal de Joinville. Joinville inicia projeto para reduzir casos de dengue com o método Wolbachia. **Joinville, 2023**. Disponível em: https://www.joinville.sc.gov.br/noticias/joinville-inicia-projeto-para-reduzir-casos-de-dengue-com-o-metodo-wolbachia/.

KOEHNTOPP, Paulo Ivo. Governança e mudança climática nas cidades contemporâneas: o caso de Joinville-SC. **Repositório Institucional da UFSC.** Florianópolis, 2012. Disponível em: http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/93922

LUIZ, Camili Marques; CARMO, Carlos Roberto Souza. Avaliação dos danos impostos ao setor privado da economia por eventos climáticos extremos no Brasil. **CONTABILOMETRIA - Brazilian Journal of Quantitative Methods Applied to Accounting**, Monte Carmelo, v. 13, n. 2, p. 86-104, jul.- dez./2026.

MARTINS-FILHO, Paulo Ricardo; CRODA, Julio; ARAUJO, Adriano Antunes de Souza; CORREIA, Dalmo; QUINTANS-JUNIOR, Lucindo José. Catstrophic Floods in Rio Grande do Sul, Brazil: The Need for Public Health Responses to Potential Infectious Disease Outbreaks. One Health. 2024. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11136508/.

MELLO, Yara Rúbia de; KOEHNTOPP, Paulo Ivo. Características climáticas da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Joinville (SC). **Acta Biológica Catarinense**, v. 4, n. 3, p. 18 – 282017. ISSN n° 2358-3363. Disponível em: https://doi.org/10.21726/abc.v4i3.604.

MENDES, Jaqueline Aparecida et al. Desafios das inundações urbanas: uma análise das medidas de controle em planos diretores na região metropolitana de Curitiba (Paraná). **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 13, n. 26, p. 19-33, 2024.

MONACHESE, Anna Pia; GÓMEZ-VILLARINO, Maria Teresa; LÓPEZ-SANTIAGO, Jesús; SANZ, Ernesto; ALMEIDA-NAUNAY, Andrés F.; ZUBELZU, Sergio; Challenges and Innovations in urban drainage systems: sustainable drainage systems focus. **Water**, v. 17, n. 1, p. 76, 2024. Disonivel em: https://doi.org/10.3390/w17010076

MONTEIRO, Ana Flavia Martins; YAMAMOTO, Ana Letícia Campos; SILVA, Paola do Nascimento; REBOITA, Michelle Simões. Conhecer a complexidade do sistema climático para entender as mudanças climáticas. **Terrae Didática**, Campinas, SP, v. 17, n. 00, p. e021006, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.20396/td.v17i00.8663763

MORSCHBACHER, Joel; HAACK, Bruna Maliska; ZUGE, Samuel Spiegelberg; BUSATO, Maria Assunta; LLINARES, Fernando Jorge Bornay; PREUSS, Jackson Fabio; LUTINSKI, Junir Antonio. Perfil epidemiológico da dengue na Região Sul do Brasil nos anos de 2014 a 2022. Hygeia – **Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, Uberlândia, v. 21, p. e2111, 2025. DOI: 10.14393/Hygeia2173087. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/73087.

MOURA, A. R. A.; FRENZEL, T.; MOURA, D. G. F. Floods in the Urban Environment and Social Vulnerability: a study case in Curitiba, Brazil. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 12, n. 8, p. 3122-3138, 2019. DOI: 10.26848/rbgf.v12.8.p3122-3138.

MUTTIL, Nasrin; SHARMA, A. Impacts of Extreme Rainfalls on Sewer Overflows and WSUD-Based Mitigation Strategies: A Review. ResearchGate, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/370123456. Acesso em: 26 out. 2025.

MULLER, Cristiane Regina; DE OLIVEIRA, Francisco Henrique; SCHARDOSIM, Patrícia Royes. A ocupação em Joinville/SC e o papel da gestão municipal para mitigação de danos causados por inundações. Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento, v. 1, n. 1, p. 23-39, 2012. Disponível em: 10.3895/rbpd.v1n1.3095

NASCIMENTO, Paulo Sérgio de Rezende; OLIVEIRA, Kisley Santos. Análise espaço-temporal da ocorrência de alagamentos em área intensamente urbanizada. **Revista Contexto Geográfico**, v. 7, n. 14, p. 01-15, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.28998/contegeo.7i14.13407

NEGRI, Robison; CUSTÓDIO, Heverson Bruno Vitoreti; DO NASCIMENTO, Marianna Luize Alves; KORBES, Sofia; Os impactos das mudanças climáticas nos projetos do sistema de drenagem urbana de Joinville/SC. **Revista de Gestão de Água da América Latina (REGA)**, v. 22, n. 2025, 2025. ISSN 2359-1919. Disponível em: https://orcid.org/0000-0002-2523-399X.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). De bilhões a trilhões: Relatório da ONU revela o verdadeiro custo dos desastres e como reduzi-los. Brasília: ONU Brasil, 2024.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. Rede de Planejamento. **Plano ICES – Indicadores de Cidades Sustentáveis.** Florianópolis: PMF, [s.d.]. Disponível em: https://redeplanejamento.pmf.sc.gov.br/pt-BR/planos/ices.

PREFEITURA MUNICIPAL DE JOINVILLE. *Joinville Cidade em Dados 2024 – Ambiente Natural*. Joinville: Secretaria de Pesquisa e Planejamento Urbano (SEPUR) e Secretaria de Desenvolvimento Econômico e Inovação (SDE), 2024. Disponível

em: https://www.joinville.sc.gov.br/wp-content/uploads/2024/12/Joinville-Cidade-em-Dados-2024-Ambiente-Natural.pdf.

SAITO, S. M.; GONÇALVES, R. S.; NISHIJIMA, T.; BARCELLOS, C. Urban population exposed to risks of landslides, floods and flash floods in Brazil. **Sociedade & Natureza**, v. 31, n. 1, p. 1-23, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.14393/SN-v31-2019-46320.

SIEBERT, Claudia. Mudanças climáticas e desastres naturais em Santa Catarina: impactos socioterritoriais e avaliação das políticas públicas. **XVII Encontro Nacional da Associação de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional.** São Paulo, p. 1-22, 2017. Disponível em: https://anais.anpur.org.br/index.php/anaisenanpur/article/view /1636/1615.

SILVEIRA, M. P. L.; SANTOS, R. R. F. dos; ARAÚJO, L. P.; BRIANEZI, D. Valoração econômica ambiental de desastres naturais ocorridos na regional oeste de Belo Horizonte, MG. Revista Mineira de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 1-18, jan./jun. 2020. DOI: 10.59824/rmrh.v1i1.194. Disponível em: https://periodicos.meioambiente.mg.gov.br/NM/article/view/194.

SILVEIRA, Wivian Nereida; KOBIYAMA, Masato. Histórico de inundação em Joinville/SC – Brasil, no período de 1851-2007. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007. Disponível em: https://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ABRH2007%20Wivian%20%28890%29.pdf.

SMAGALLA, M. et al. História recente das inundações em Joinville (2009–2019). REGA – Revista de Gestão de Águas da América Latina, 2020.

SOARES, A. C.; MORAES, R.; FERREIRA, L. Relação entre temperatura, precipitação e incidência de dengue no Brasil. Revista Brasileira de Climatologia, 2021.

SOUZA, F. et al. Chuvas intensas e seus reflexos econômicos: um estudo sobre os impactos dos desastres hidrológicos. Belo Horizonte: REGA, 2023.

SUN, Qinke; FANG, Jiayi; DANG, Xuewei; XU, Kepeng; FANG, Yongqiang; LI, Xia; LIU, Min. Multi-scenario urban flood risk assessment by integrating future land use change models and hydrodynamic models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 22, n. 11, p. 3815–3829, 2022. DOI: 10.5194/nhess-22-3815-2022.

TEIXEIRA, M. G.; BARRETO, M. L.; LIMA, E. P.; MONTEIRO, A. M. Urbanização, condições ambientais e transmissão da dengue no Brasil. Revista Brasileira de Epidemiologia, Rio de Janeiro, v. 26, e230010, 2023. DOI: 10.1590/1980-549720230010.

TELES, Alessandra Jacomelli; BOHM, Bianca Conrad; SILVA, Suellen Caroline; BRUHN, Fábio Raphael. Socio-geographical factors and vulnerability to leptospirosis in South Brazil. **BMC Public Health,** v. 23, p. 1311, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s12889-023-16094-9

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNDRR). Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2025: Resilience Pays – Financing and Investing for Our Future. Geneva: UNDRR, 2025. Disponível em: https://www.undrr.org/gar2025.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNDRR). *The True Cost of Disasters 2024 Report.* Geneva, 2024.

GOVERNANÇA CLIMÁTICA E DEMOCRACIA URBANA: LIMITES E POSSIBILIDADES DA PARTICIPAÇÃO SOCIAL NA POLÍTICA CLIMÁTICA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

1 Ana Sofia da Fonseca Pereira
1 anasofiafp@gmail.com

Palavras-chave: Gestão do clima; Governança Climática; Participação social.

Resumo

O presente artigo analisa os limites e as possibilidades da participação social na política climática do município de São Paulo, Brasil, a partir dos enfoques da governança climática e da democracia urbana. O estudo parte da compreensão de que as mudanças climáticas intensificam desigualdades socioespaciais e evidenciam a necessidade de modelos de governança capazes de articular diferentes atores, escalas e instrumentos institucionais. Nesse contexto, a participação social assume um papel central na construção de políticas públicas mais legítimas, inclusivas e eficazes, especialmente em territórios urbanos marcados por alta complexidade e vulnerabilidade social. A pesquisa adota uma abordagem qualitativa, fundamentada em revisão bibliográfica e na análise documental de instrumentos normativos, de planos climáticos e de relatórios institucionais do município de São Paulo. Foram examinados documentos oficiais relacionados à Política Municipal de Mudança do Clima, ao Plano de Ação Climática (PlanClima SP) e aos inventários de emissões de gases de efeito estufa, bem como registros de processos participativos associados à formulação e revisão dessas políticas. A análise também considera o histórico de institucionalização da governança climática no município, incluindo sua inserção em redes internacionais e a evolução de seus mecanismos de planejamento, monitoramento e transparência. A pesquisa indica que o município de São Paulo apresenta avanços relevantes na consolidação de um arcabouço institucional alinhado às agendas globais de enfrentamento das mudanças climáticas, o que evidencia um processo incremental de fortalecimento da governança climática local. Entretanto, também se identificam limitações significativas no campo da participação social, caracterizadas pelo baixo nível de engajamento da população, pela predominância de mecanismos de caráter consultivo e pela limitada capacidade de incidência da sociedade civil nos processos decisórios. Adicionalmente, observam-se desafios relacionados à acessibilidade e à compreensão da informação ambiental, bem como à persistência de desigualdades socioespaciais que condicionam a participação e a afetam de forma mais intensa nos grupos socialmente vulneráveis. Conclui-se que, embora a governança climática no município apresente um grau elevado de institucionalização e de alinhamento com compromissos internacionais, persiste um descompasso entre a estrutura formal das políticas e a efetividade democrática de seus processos. Nesse sentido, o fortalecimento da participação social, a ampliação do acesso qualificado à informação ambiental e a incorporação de diferentes saberes e atores no processo decisório configuram-se como elementos fundamentais para o aprimoramento das políticas climáticas e para a construção de cidades mais resilientes, inclusivas e socialmente justas.

Introdução

As mudanças climáticas intensificam problemas urbanos, ambientais e sociais em diferentes territórios, comprometendo a resiliência das cidades e afetando de forma mais severa as populações socialmente vulneráveis (Behnassi et al., 2022). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022), esses impactos incluem riscos à saúde, à segurança, à mobilidade urbana, à produção de alimentos e ao acesso à energia, evidenciando a magnitude do desafio climático contemporâneo.

Diante desse cenário, a governança climática tem sido apontada como um importante instrumento para a articulação de políticas públicas voltadas ao enfrentamento das mudanças climáticas e à promoção de estratégias de adaptação e mitigação. Esse contexto também revela a intensificação das desigualdades socioambientais e a limitada capacidade de adaptação de grupos vulneráveis, reforçando a dimensão de justiça social associada à crise climática (Sibiya et al., 2022).

Considerando que as cidades ocupam posição central nos espaços políticos da democracia, diversos impasses se apresentam à democracia urbana, entre os quais se destacam a injustiça social e as mudanças climáticas. Diferentes atores passam a enfrentar esses desafios, impulsionando a construção de inovações democráticas relacionadas à cidadania, ao ambientalismo e à participação (Beveridge; Koch, 2022; Shelly, 2022; Taylor et al., 2020).

As diversas realidades econômicas, sociais e políticas fazem com que cada território adote percepções distintas sobre as medidas necessárias ao enfrentamento das mudanças climáticas, o que pode dificultar a construção de consensos e a implementação de ações eficazes (Stefanello, 2023). Além disso, observa-se a emergência de novos atores e formas de governança, caracterizados pela articulação entre diferentes níveis de governo e pela atuação da sociedade civil, cujos desafios envolvem a diversidade de interesses e prioridades entre os territórios (Torres et al., 2021).

No contexto brasileiro, o município de São Paulo destaca-se como importante objeto de análise, em razão de sua elevada densidade populacional, complexidade socioespacial e protagonismo na formulação de políticas climáticas. Com população estimada em mais de 11 milhões de habitantes e expressiva urbanização, a cidade enfrenta desafios significativos relacionados à vulnerabilidade socioambiental, à intensificação de eventos extremos e à necessidade de implementar estratégias eficazes de mitigação e adaptação às mudanças climáticas (IBGE, 2025).

Desse modo, o presente estudo tem por objetivo analisar os limites e as possibilidades da participação social na política climática do município de São Paulo, Brasil, à luz do debate sobre governança climática e democracia urbana, buscando compreender como os mecanismos participativos contribuem para a formulação e implementação de políticas públicas voltadas ao enfrentamento das mudanças climáticas.

Referencial Teórico

Governança climática

O debate sobre governança climática tem se fortalecido nas últimas décadas em razão da necessidade crescente de articulação entre diferentes atores institucionais para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas. O conceito de governança climática vem se consolidando como um modelo de gestão que envolve múltiplos atores e níveis de atuação (locais e globais), abrangendo governos, instituições públicas e privadas, bem como a sociedade civil, com o objetivo de formular e implementar políticas públicas capazes de mitigar os impactos ambientais e promover a adaptação às mudanças climáticas. Nesse cenário, as cidades assumem especial relevância na adoção dessas políticas, haja vista que concentram parcela significativa da população, das atividades econômicas e das infraestruturas essenciais, além de serem responsáveis pela maior parte das emissões de gases de efeito estufa, o que as torna particularmente vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas (Martins; Ferreira, 2011).

A Agenda 2030 da ONU apresenta 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, entre os quais o ODS 13, que, na meta 13.b, estabelece que os países aderentes deverão promover mecanismos de planejamento relacionados à mudança do clima e à gestão eficaz, inclusive no tocante às comunidades locais (ONU, 2015). Dessa forma, a adoção de medidas aptas à mitigação e à adaptação às urgências climáticas, bem como a edição de Planos Climáticos pelos entes federativos, alinham-se aos compromissos assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris e na Agenda 2030 da ONU (Cavalcante, 2025). Assim, os governos locais, por estarem mais próximos da população, desempenham um papel fundamental na promoção de estratégias de adaptação e mitigação às mudanças climáticas, favorecendo uma maior capacidade de articulação de políticas públicas voltadas à redução da vulnerabilidade socioambiental e ao fortalecimento da resiliência urbana (Martins, 2010).

No Brasil, a governança climática encontra amparo em um robusto arcabouço normativo e institucional. Contudo, vem enfrentando uma série de desafios para a sua implementação. Isto porque estudos recentes apontam que as barreiras institucionais e a falta de integração entre os diversos entes federativos limitam a eficácia das ações voltadas ao enfrentamento das mudanças climáticas (Cavalcante, 2025).

Nesse sentido, embora a literatura reconheça que a participação social e os instrumentos da democracia participativa são essenciais para a construção de políticas públicas mais inclusivas e eficazes, observa-se que, no campo da governança climática, ainda persistem desafios relacionados à efetiva incorporação desses mecanismos nos processos decisórios. Desse modo, a participação social não deve ser compreendida apenas como um elemento normativo ou formal das políticas climáticas, mas como uma condição estruturante para a formulação de soluções mais adequadas às realidades locais, especialmente diante da complexidade e das desigualdades inerentes às mudanças climáticas (Franco Junior; Cabral Neto, 2025).

Diante desse contexto, a governança climática pressupõe não apenas a atuação coordenada entre os diferentes níveis de governo e as instituições formais, mas também a participação da sociedade civil nos processos de elaboração e implementação de políticas públicas voltadas ao enfrentamento das mudanças climáticas. A participação social aparece como um fator fundamental para o fortalecimento da governança climática, na medida em que amplia a legitimidade das decisões públicas, favorece a transparência e possibilita a incorporação das demandas e dos saberes das comunidades locais.

Participação social

A participação social tem sido apontada como um elemento relevante para a formulação e a implementação de políticas climáticas, contribuindo para a construção de decisões mais legítimas, inclusivas e eficazes. A literatura indica que a inclusão da sociedade civil nos processos decisórios tende a ampliar a aceitação pública das políticas e a fortalecer a confiança nas instituições, especialmente em contextos marcados por alta complexidade e incerteza (Perlaviciute, 2022; Liu et al., 2020b).

Assim, a participação pública pode ser compreendida como um processo que busca incorporar diferentes interesses e perspectivas na formulação de políticas, promovendo maior transparência e legitimidade. Contudo, apesar de sua relevância, observa-se que, em muitos casos, a participação é limitada, com reduzida capacidade de influência efetiva nos processos decisórios, o que evidencia a predominância de mecanismos de caráter consultivo (Atkinson; Zimmermann, 2018; Ruud; Barlindhag; Staver, 2019).

Ademais, a literatura aponta que a participação social não deve ser compreendida como um modelo estático ou meramente formal, mas como um processo dinâmico, que se constrói a partir do engajamento contínuo e da interação entre diferentes atores sociais (Chilvers et al., 2018). Nessa perspectiva, a adoção de procedimentos participativos inovadores pode contribuir para aproximar os cidadãos dos processos de formulação de políticas públicas, fortalecendo valores democráticos como a legitimidade, a eficácia e a justiça social (Beauvais; Warren, 2019).

No âmbito das mudanças climáticas, a importância da participação social tem sido reiterada em documentos internacionais, desde a Conferência Rio-92 até relatórios mais recentes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2018), que destacam a participação pública como elemento fundamental para o planejamento da adaptação e o enfrentamento dos riscos climáticos. Além disso, no campo dos direitos humanos, a participação é reconhecida como um direito

procedimental essencial, que permite à sociedade civil exercer controle democrático sobre a atuação estatal, contribuindo para a transparência, a responsabilização e a efetividade das políticas públicas.

Políticas climáticas

Após o Acordo de Paris em 2015, diversas nações começaram a adotar medidas pragmáticas para implementar políticas climáticas nacionais, estabelecendo metas de redução de emissões (Matemilola et al., 2023). Embora ainda existam lacunas consideráveis entre as ambições declaradas e o que de fato foi implementado (Dubash, 2020). Diante disso, essa questão é de extrema importância, considerando que em países em desenvolvimento existem limitações institucionais, econômicas, ambientais e sociais que dificultam a implementação e restringem os instrumentos de monitoramento e avaliação para as políticas climáticas (Giles et al., 2021; Laudari et al., 2021, Ssekamatte, 2018).

Em resposta a esse cenário, as políticas climáticas são formuladas a partir de um conjunto de decisões que estabelecem metas, como a redução de carbono, e a concepção de transições para uma economia de baixo carbono, bem como a unificação de programas e estratégias eficientes para sua implementação. Neste contexto, a aplicação de medidas políticas específicas, como impostos, subsídios, construção de infraestrutura e adoção de tecnologias, pode consolidar vários setores e atingir diversos territórios em nível nacional, regional, local e internacional com eficácia (Perlaviciute; Squintani, 2020 ; Squintani ; Perlaviciute, 2020).

No entanto, para Feola et al (2019), a política climática deveria apoiar as comunidades no desenvolvimento de suas próprias capacidades para interpretar e responder às mudanças climáticas de maneiras que considerem apropriadas, além de envolver a combinação de conhecimento científico e tradicional junto às comunidades para que experimentem no desenvolvimento de suas próprias respostas. Nesse sentido, pesquisas inovadoras sobre cultura e identidade na ação climática indicam que atores de políticas públicas e de governança podem precisar ir além de estratégias instrumentais, como incentivos, sanções e fornecimento de informações, para implementar políticas climáticas ambiciosas de descarbonização (Patterson, 2022).

Planejamento urbano climático

O planejamento urbano climático vem se consolidando como um campo estratégico no enfrentamento das mudanças climáticas em contextos urbanos, especialmente pela necessidade de integrar diferentes dimensões da governança e promover a cooperação entre múltiplos atores (Fuchs; Kirsten, 2025). Nesse sentido, ferramentas analíticas, como os atlas climáticos urbanos, têm sido amplamente utilizadas para sistematizar e interpretar condições ambientais e espaciais, permitindo a incorporação de parâmetros climáticos em diferentes escalas territoriais e a tradução de evidências científicas em subsídios técnicos para o planejamento e a tomada de decisão (Chen et al., 2019). Contudo, apesar desses avanços, ainda se observa a ausência de padrões globais consistentes para a descrição quantitativa e a aplicação desses instrumentos, o que limita sua comparabilidade e efetividade em contextos distintos. Tal lacuna evidencia a necessidade de desenvolver métricas e abordagens mais integradas e padronizadas, capazes de fortalecer respostas urbanas mais consistentes frente a eventos climáticos extremos e inundações (Jin et al., 2020).

Material e Métodos

Este estudo adota abordagem qualitativa, reconhecendo que a pesquisa qualitativa pode assumir diferentes definições, conceitos e temáticas em cada área do conhecimento, possibilitando ao pesquisador interpretar singularidades e multiplicidades a partir de diferentes opções metodológicas (Alberto e Ferreira, 2022, p.359; Yin, 2016), que contextualiza o objeto de estudo, que investiga os limites e possibilidades da participação social na política climática do município de São Paulo, São Paulo, Brasil. A pesquisa fundamenta-se em revisão bibliográfica e no levantamento documental, as buscas da literatura foram realizadas pelas plataformas de bases de dados web Elsevier/ Science Direct e Periódicos Capes, utilizando as palavras indexadas climate governance AND urban democracy AND social engagement. Para o levantamento documental, as buscas foram realizadas nas plataformas oficiais da Prefeitura de São Paulo. Para a análise sistemática dos documentos, foram selecionados os documentos apresentados.

Histórico das ações de governança climática no município de São Paulo

A construção da governança climática no município de São Paulo caracteriza-se por um processo incremental de institucionalização normativa, de incorporação de instrumentos técnicos e de crescente articulação com redes transnacionais de cidades. Esse percurso evidencia a consolidação de capacidades estatais locais orientadas à mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e à adaptação às mudanças climáticas.

A inserção internacional do município constitui um marco inicial relevante. Em 1991, São Paulo figurou entre as cidades fundadoras do ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade, consolidando sua participação em redes voltadas à difusão de boas práticas e ao fortalecimento da agenda ambiental em nível local. Posteriormente, em 2005, a cidade integrou o C40 Cities Climate Leadership Group, ampliando sua atuação no âmbito da governança climática global e aderindo a compromissos voluntários de redução de emissões.

No plano institucional doméstico, observa-se a criação, em 2005, do Comitê Municipal de Mudança do Clima, responsável por promover a articulação intersetorial e subsidiar a formulação de políticas públicas. Esse avanço foi seguido pela promulgação da Política Municipal de Mudança do Clima, por meio da Lei nº 14.933/2009, que estabeleceu diretrizes, metas e instrumentos para a mitigação e a adaptação, configurando um dos primeiros marcos regulatórios subnacionais no Brasil (SÃO PAULO, 2009).

A partir desse arcabouço normativo, o município avançou na estruturação de instrumentos técnicos. Em 2011, foram publicadas diretrizes para o Plano de Ação para Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas, o que representou um esforço inicial de planejamento estratégico integrado (SÃO PAULO, 2011). Em 2012, foi divulgado o primeiro inventário municipal de emissões de GEE, um instrumento fundamental para o diagnóstico das fontes emissoras e o monitoramento das políticas públicas (SÃO PAULO, 2012).

A década seguinte foi marcada pelo fortalecimento dos compromissos internacionais e pela sofisticação dos mecanismos de monitoramento. Em 2018, o município aderiu ao compromisso Deadline 2020, no âmbito do C40 Cities Climate Leadership Group, o que demandou a elaboração de planos climáticos alinhados às metas do Acordo de Paris, especialmente à limitação do aquecimento global a 1,5 °C (C40, 2016). Em 2019, foi publicado o terceiro inventário de emissões de GEE, abrangendo o período de 2010 a 2017, o que evidencia a evolução metodológica e a ampliação da base de dados disponível (SÃO PAULO, 2019).

No âmbito institucional, destaca-se a criação da Secretaria Executiva de Mudanças Climáticas (SeClima), instituída pelo Decreto nº 60.289/2021, que reforçou a centralidade da agenda climática na estrutura administrativa municipal (SÃO PAULO, 2021). Entre 2022 e 2025, consolidou-se um ciclo contínuo de monitoramento e transparência, com a publicação anual de relatórios do Plano de Ação Climática (PlanClima SP) e dos inventários de emissões referentes ao período de 2018 a 2022, ampliando a rastreabilidade das ações implementadas (SÃO PAULO, 2022; 2023; 2024; 2025).

A primeira revisão do Plano de Ação Climática, realizada em 2025, sintetiza esse processo evolutivo. Tal revisão incorpora atualizações metodológicas, novos dados empíricos e o alinhamento às agendas internacionais mais recentes, refletindo o amadurecimento institucional e a consolidação de um modelo de governança climática baseado em planejamento adaptativo, monitoramento contínuo e integração multinível.

Justiça Climática

A abordagem da justiça climática no município de São Paulo revela que os impactos das mudanças climáticas apresentam distribuição espacial desigual, refletindo e intensificando vulnerabilidades socioespaciais historicamente estruturadas. Conforme estabelecido no Plano de Ação Climática do Município de São Paulo, o município já se encontra exposto a riscos climáticos relevantes, como, notadamente, ondas de calor, inundações e secas meteorológicas, cujas projeções indicam intensificação até 2050, com padrões territoriais condicionados por características urbanas e socioambientais, bem como pela dinâmica de uso e ocupação do solo. Esse quadro está associado ao processo de urbanização desigual e, em grande medida, desordenado, que resulta em distintos níveis de exposição e de capacidade adaptativa entre as regiões da cidade. Evidências derivadas de séries históricas e projeções climáticas apontam que tais impactos incidem de forma desproporcional sobre grupos populacionais vulneráveis, incluindo idosos, crianças, pessoas em situação de rua e populações residentes em áreas periféricas, sendo a vulnerabilidade compreendida de maneira multidimensional, incorporando não apenas fatores socioeconômicos, mas também aspectos demográficos e condições de saúde (Prefeitura de São Paulo, 2021; Prefeitura de São Paulo, 2025).

Nesse contexto, o fortalecimento da resiliência urbana e a redução das vulnerabilidades constituem objetivos centrais da política climática municipal, orientados pelo princípio da justiça climática, que fundamenta a priorização territorial e social das estratégias de adaptação e mitigação. Tais estratégias concentram-se nas áreas e populações mais expostas aos riscos identificados, articulando intervenções que visam simultaneamente à redução dos impactos climáticos e à promoção de benefícios, como a melhoria da qualidade ambiental, do bem-estar e do acesso a serviços urbanos. A revisão mais recente do plano evidencia o aprofundamento do debate sobre justiça climática, com a incorporação mais explícita da diversidade de vulnerabilidades presentes no município e o reconhecimento do papel estruturante das políticas públicas na mitigação dessas vulnerabilidades. Ademais, destaca-se a ampliação do processo participativo, com o envolvimento de diferentes secretarias municipais e de instituições da sociedade civil, o que consolida uma abordagem intersetorial na formulação das ações. Esse avanço se materializa na definição de novos objetivos estratégicos, metas e instrumentos de implementação, bem como na incorporação transversal da justiça climática como eixo orientador de todo o plano (Prefeitura de São Paulo, 2021; Prefeitura de São Paulo, 2025).

Resultados

A análise da governança climática no município de São Paulo aponta um cenário de avanços institucionais relevantes, acompanhado de limitações importantes no campo da participação social. No âmbito da revisão do Plano de Ação Climática (PlanClima SP), a consulta pública permaneceu disponível por 19 dias na plataforma Participe Mais, período em que foram registradas 212 contribuições. A devolutiva indicou que 127 propostas não foram contempladas, 16 foram parcialmente incorporadas, 23 foram acolhidas e 27 não apresentaram conteúdo. Considerando a dimensão populacional do município, observa-se um baixo nível de participação social.

No plano institucional, verifica-se a consolidação de um arcabouço normativo robusto, com destaque para a Política Municipal de Mudança do Clima e para a criação do Comitê Municipal e da Secretaria Executiva de Mudanças Climáticas (SeClima), instituída em 2021, o que representou um avanço ao conferir maior centralidade e coordenação à agenda climática no âmbito da administração municipal. Soma-se a isso a elaboração contínua de instrumentos técnicos, como inventários de emissões de gases de efeito estufa e relatórios do PlanClima SP, evidenciando o alinhamento progressivo do município às agendas globais, como o Acordo de Paris e a Agenda 2030 (Cavalcante, 2025; Martins; Ferreira, 2011)

A trajetória histórica demonstra um processo incremental de institucionalização, caracterizado pela inserção do município em redes internacionais, como ICLEI e C40, e pela consolidação de práticas de monitoramento, avaliação e

transparência, destacadas pela publicação periódica de inventários e relatórios climáticos. Esse processo reflete o amadurecimento técnico e o aprimoramento metodológico da governança climática local (C40, 2016; São Paulo, 2019; São Paulo, 2025).

Contudo, apesar desses avanços, persistem limitações estruturais relacionadas à participação social. Os mecanismos existentes apresentam caráter predominantemente consultivo, com reduzida capacidade da sociedade civil de influenciar efetivamente os processos decisórios, o que compromete a legitimidade das políticas públicas e reforça assimetrias de poder (Atkinson; Zimmermann, 2018; Franco Junior; Cabral Neto, 2025). Soma-se a isso a desigualdade socioespacial na participação, com menor engajamento de populações vulneráveis, justamente as mais afetadas pelos impactos das mudanças climáticas (Sibiya et al., 2022; Behnassi et al., 2022).

Ademais, identificam-se desafios relacionados à articulação institucional e à integração entre diferentes atores, bem como limitações na incorporação de saberes locais, em razão da predominância de abordagens tecnocráticas. Embora haja avanços na transparência, a acessibilidade à informação ainda se mostra restrita, especialmente em virtude da linguagem técnica adotada, o que dificulta a participação qualificada da população (Feola et al., 2019; Chen et al., 2019).

Por fim, observa-se uma tensão entre a urgência das respostas às mudanças climáticas e a natureza dos processos democráticos, na medida em que a necessidade de decisões rápidas pode favorecer a centralização das decisões em detrimento de processos participativos mais amplos. Esse cenário evidencia o descompasso entre a estrutura formal da governança climática e a sua efetividade democrática. Assim, o fortalecimento da participação social emerge como condição essencial para tornar a governança climática mais inclusiva, legítima e eficaz no enfrentamento das mudanças climáticas (Gonçalves; Freire; Rei, 2022; Chilvers et al., 2018).

Referências Bibliográficas

ALBERTO, G. S.; FERREIRA, J. L. Análise de Conceito e Análise Temática na pesquisa qualitativa em educação. **Debates em Educação**, v. 14, n. 36, p. 358–378, 2022. Disponível em: https://www.seer.ufal.br/index.php/debateseducacao/article/view/13678. Acesso em: 19 mar. 2023.

ATKINSON, Rob; ZIMMERMANN, Karsten. Area-based initiatives–a facilitator for participatory governance?. In: **Handbook on participatory governance**. Edward Elgar Publishing, 2018. p. 267-290.

BEAUVAIS, Edana; WARREN, Mark E. What can deliberative mini-publics contribute to democratic systems?. **European Journal of Political Research**, v. 58, n. 3, p. 893-914, 2019.

BEHNASSI Mohamed; GUPTA, Himangana; BAIG, Mirza Barjees; NOORKA, IjazRasool (eds). The Food Security, Biodiversity, and Climate Nexus. Springer, 2022.

BEVERIDGE, Ross; KOCH, Philippe. **How cities can transform democracy**. John Wiley & Sons, 2022.

CAVALCANTE, Ailton Ferreira. Desafios da governança climática no Brasil: o plano clima é a solução?. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 23, n. 3, p. e9269-e9269, 2025.

CHEN, Chaomei; SONG, Min. Visualizing a field of research: A methodology of systematic scientometric reviews. **PloS one**, v. 14, n. 10, p. e0223994, 2019.

CHILVERS, Jason; PALLETT, Helen; HARGREAVES, Tom. Ecologies of participation in socio-technical change: The case of energy system transsitions. Energy Research 7 Social Science, [s.l.], v.42,p.199-210, 2018.

CORTE INTERAMERICANA DE DIREITOS HUMANOS.
Caso Claude Reyes y otros vs. Chile. Sentença de 19 de setembro de 2006. San José: Corte IDH, 2006. Disponível em: https://www.corteidh.or.cr/docs/casos/articulos/seriec_151_esp.pdf
Acesso em: 12 abr. 2026.

CORTE INTERAMERICANA DE DIREITOS HUMANOS.
Opinião Consultiva OC-23/17, de 15 de novembro de 2017. Meio ambiente e direitos humanos. San José: Corte IDH, 2017. Disponível em: https://www.corteidh.or.cr/docs/opiniones/seriea_23_por.pdf
Acesso em: 12 abr. 2026.

DUBASH, Navroz K. Revisiting climate ambition: The case for prioritizing current action over future intent. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 11, n. 1, p. e622, 2020.

Feola, Giuseppe, Hilary Geoghegan, and Alex Arnall, eds. *Climate and culture: Multidisciplinary perspectives on a warming world*. Cambridge University Press, 2019.

FRANCO JUNIOR, Abelardo; CABRAL NETO, Cirino Adolfo. **Participação social e democracia participativa como estratégias para a governança climática sustentável.** Revista SIDC, Itajaí: UNIVALI, 2025. Disponível em: https://periodicos.univali.br/index.php/SIDC/article/view/21904.

FUCHS, Marisa; KIRSTEIN, Madeleine Loren. Interdisciplinary participation in climate-adapted urban land-use planning–findings of two gaming simulations in the city of Bottrop, Germany. **International Journal of Climate Change Strategies and Management**, v. 17, n. 1, p. 200-217, 2025.

GILES, James et al. Barriers to implementing climate policies in agriculture: a case study from Viet Nam. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, p. 439881, 2021.

GONÇALVES, Alcindo; FREIRE, Daniel; , Fernando(orgs.). Governança Global: desafios e complexidade. Santos(SP):EditoraUniversitáriaLeopoldianum.2021.E-book.Disponívelem:https://www.unisantos.br/wp-content/uploads/2021/03/governanca-global-2021-e-book.pdf

HOEN, Ben et al. Attitudes of US wind turbine neighbors: analysis of a nationwide survey. Energy Policy, [s.I.], v. 134,p 110981, nov.2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110981.

IPCC, 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptationand Vulnerability.Contribution of Working Group II tothe Sixth Assessment Reportof the Intergovernmental Panelon Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UKand New York, NY, USA, 3056p. Disponívelem: <https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf.> Acesso em: 14 mai.2023.

JIN, Lei et al. Block-based local climate zone approach to urban climate maps using the UDC model. **Building and Environment**, v. 186, p. 107334, 2020.

LAUDARI, Hari Krishna et al. What lessons do the first Nationally Determined Contribution (NDC) formulation process and implementation outcome provide to the enhanced/updated NDC? A reality check from Nepal. **Science of the Total Environment**, v. 759, p. 143509, 2021.

LIU, Lu *et al.* Public participation in decision making, perceived procedural fairness and public acceptability of renewable energy projects. **Energy and Climate Change,** [s.I.], v. 1, 100013, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2020.100013> Acesso em: 7 abr. 2026.

MARTINS, Rafael D.'Almeida. Governança climática nas cidades: reduzindo vulnerabilidades e aumentando resiliência. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 4, n. 2, p. 5-18, 2010.

MARTINS, Rafael D.'Almeida; FERREIRA, Leila da Costa. Uma revisão crítica sobre cidades e mudança climática: vinho velho em garrafa nova ou um novo paradigma de ação para a governança local?. **Revista de Administração Pública** , v. 45, p. 611-641, 2011.

MATEMILOLA, Saheed; FADEYI, Oluwaseun; SIJUADE, Timothy. Acordo de Paris. In: **Enciclopédia de gestão sustentável** . Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 2555-2559.

ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS (OEA).
Estratégia Interamericana para a Promoção da Participação Pública na Tomada de Decisões sobre Desenvolvimento Sustentável. Washington, DC: OEA, 2000. Disponível em: http://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea26p.htm
Acesso em: 12 abr. 2026.

PATTERSON, James J. Culture and identity in climate policy. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 13, n. 3, p. e765, 2022.

PERLAVICIUTE, Goda; SQUINTANI, Lorenzo. Public participation in climate policy making: toward reconciling public preferences and legal frameworks. **One Earth,** [s.I.], v. 2, n. 4, p. 341-348, abr. 2020.

PERLAVICIUTE, Goda. Contested climate policies and the four Ds of public participation: From normative standards to what people want. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 13, n. 1, p. e749, 2022.

QUINTANI, Lorenzo; PERLAVICIUTE, Goda. Access to Public Participation: Unveiling the Mismatch between what Law Prescribes and what the Public Wants. *In:* PEETERS, Marjan; ELIANTONIO, Mariolina (eds.). **Research Handbook on EU**

Environmental Law. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2020. cap.9, p.

RUUD, Marit Ekne; BARLINDHAUG, Rolf; STAVER, Anne Balke. Kunnskapsoversikt: Områderettet innsats som virkemiddel. Internasjonale eksempler. 2020.

SHELLEY, Cain. Murray Bookchin and the value of democratic municipalism. **European Journal of Political Theory**, v. 23, n. 2, p. 224-245, 2024.

SIBIYA, Nomfundo et al. Empowering the voiceless: Securing the participation of marginalised groups in climate change governance in South Africa. **Sustainability**, v. 14, n. 12, p. 7111, 2022.

SSEKAMATTE, David. The role of monitoring and evaluation in climate change mitigation and adaptation interventions in developing countries. **African Evaluation Journal**, v. 6, n. 1, p. 1-9, 2018.

STEFANELLO, M. A biodiversidade como valor concretizador do direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado.Revista Missioneira, v. 25, n. 1, p. 49-63, 17 ago. 2023.

TAYLOR, Charles; NANZ, Patrizia; TAYLOR, Madeleine Beaubien. **Reconstructing Democracy: How citizens are building from the ground up**. Harvard University Press, 2020.

TORRES, Pedro Henrique Campello et al. Justiça climática e as estratégias de adaptação às mudanças climáticas no Brasil e em Portugal. Estudos Avançados, 35 (102), 301-320, maio-ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.010> Acesso em; 05 fev. 2024.

YIN, R.K. **Pesquisa qualitativa do início ao fim.** Porto Alegre: Penso, 2016.

C40 CITIES. Deadline 2020: How cities will get the job done. London: C40 Cities Climate Leadership Group, 2016.

ICLEI – GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE. Local Governments for Sustainability – histórico institucional. Disponível em: https://www.iclei.org. Acesso em: 8 abr. 2026.

SÃO PAULO (Município). Lei nº 14.933, de 5 de junho de 2009. Institui a Política de Mudança do Clima no Município de São Paulo. Diário Oficial da Cidade de São Paulo, 2009.

SÃO PAULO (Município). Diretrizes para o Plano de Ação para Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas. São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo, 2011.

SÃO PAULO (Município). Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Município de São Paulo. São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo, 2012.

SÃO PAULO (Município). 3º Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Município de São Paulo (2010–2017). São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo, 2019.

SÃO PAULO (Município). Decreto nº 60.289, de 2021. Dispõe sobre a criação da Secretaria Executiva de Mudanças Climáticas (SeClima). Diário Oficial da Cidade de São Paulo, 2021.

SÃO PAULO (Município). Plano de Ação Climática do Município de São Paulo (PlanClima SP) – Relatórios de Monitoramento. São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo, 2022–2025.

CONTRIBUIÇÕES E DESAFIOS PARA A FORMULAÇÃO DE POLÍTICAS CLIMÁTICAS: UMA ANÁLISE DO COMITÊ GESTOR INTERSECRETARIAL DE JUSTIÇA CLIMÁTICA EM SÃO VICENTE (SP)

1 Luiz Guilherme Ferreira Pires, 2 Mayara de Souza Modesto, 3 Gabriel Pires de Araújo, 4 Amanda Cseh
1 Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE USP), e-mail: luizguilhermeferreira@usp.br; 2 Universidade Federal do ABC (UFABC), e-mail: mayara.modesto@aluno.ufabc.edu.br; 3 IEE USP, e-mail: gabrielparaujo.ga@gmail.com; 5 IEE-USP, e-mail: amanda.cseh@usp.br

Palavras-chave: Justiça Climática; Governança Climática; Políticas Públicas.

Resumo

A justiça climática processual, um dos pilares da justiça climática, permite analisar os processos da agenda climática a partir da transparência, inclusão e justiça. A análise a partir dos processos de construção da política climática permite compreender como as estruturas construídas para endereçar a agenda climática contribuem ou prejudicam as populações, sobretudo as mais afetadas pela crise climática. O município de São Vicente, localizado na Baixa Santista no estado de São Paulo, apresenta-se como caso representativo para analisar as contribuições e os desafios de um instrumento voltado para justiça climática, o Comitê Gestor Intersecretarial de Justiça Climática. A análise do instrumento permite não apenas compreender as dinâmicas internas desse arranjo institucional, mas também aferir em que medida ele constitui, ou pode vir a constituir, um espaço de transformação das relações de poder que estruturam a vulnerabilidade climática local. Para isso, o artigo organiza a análise em torno de três dimensões que se articulam ao marco da justiça climática processual: (i) as condições de transparência, inclusão e justiça no funcionamento do Comitê; (ii) a incorporação e abordagem das temáticas de justiça climática nas reuniões; e (iii) os desdobramentos gerados para a agenda climática do município. A pesquisa parte de uma abordagem qualitativa de estudo de caso único e os métodos de observação participante e análise documental. A institucionalização pode ser entendida como uma janela de oportunidade para endereçar a agenda climática e articular diferentes saberes, principalmente na aproximação entre a universidade e a gestão pública. É possível destacar lacunas e desafios na transparência (dificuldades na produção regular e divulgação dos registros das reuniões), inclusão (participação regular das secretarias e pautas que envolvem grupos sociais vulnerabilizados) e justiça (estrutura do instrumento) na análise da justiça climática processual do Comitê. Na segunda dimensão de análise é notado um avanço no escopo temático das reuniões, apesar de desvios de tema e indicativos de endereçar a questão climática como problema ambiental-operacional. Na terceira dimensão foram identificados desdobramentos com continuidade efetiva (oficinas participativas, reuniões com metodologias ativas e trilhas formativas) aumentando o alcance do projeto e itens sem continuidade ou continuidade parcial (palestras, atividades de letramento e planejamento). O instrumento, portanto, contribui em parte para endereçar a agenda de justiça climática no município com atividades voltadas para grupos sociais vulnerabilizados e enfrenta desafios relacionados com dinâmicas de poder, intersecretariedade e diálogo.

Introdução

Em dezembro de 2025 o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) lançou uma resolução considerada um avanço no reconhecimento da desproporcionalidade entre os impactos ambientais e climáticos no país (Brasil, 2025). A Resolução CONAMA Nº 511 define os princípios e diretrizes para incorporação da justiça climática e combate ao racismo ambiental em políticas ambientais, atribuições para os órgãos componentes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e estabelecimento de diretrizes holísticas no combate à crise climática e ao racismo ambiental (Brasil, 2025). O fortalecimento da participação social e inclusão e priorização das populações vulnerabilizadas são focos da resolução que indica um diálogo entre essa agenda e as evidências científicas sobre medidas para efetivamente endereçar o combate à crise climática. Entretanto, a justiça climática, composta por diversos movimentos sociais e campos de estudo críticos, remonta décadas de teorização e mobilização a partir da virada do século XXI (Schlosberg; Collins, 2014), perpassando o reconhecimento dos diferentes, desiguais e desproporcionais impactos das mudanças climáticas em determinados grupos e territórios e com destaque para injustiças resultantes das respostas à crise climática (Sultana, 2022). Há, portanto, uma visão ética e política de igualdade, direitos humanos e saúde ambiental para o futuro (Jacobi; Filho; Pierro, 2022), que é discutida nos campos de justiça climática e, recentemente, compõe uma frente dentro da agenda do governo federal.

Destaca-se que essa discussão passou a ganhar força a partir de 2023 após um período de gestão federal marcada por negacionismos e retrocessos (Franchini; Mauad; Viola, 2020; Menezes; Barbosa Jr., 2021), o que denota a complexidade envolvida na elaboração, implementação e perenidade de políticas públicas ambientais e climáticas. Diezmartínez e Gianotti (2022) apresentam que poucas cidades ao redor do mundo efetivamente incorporam de forma significativa metas de equidade ou justiça em suas estratégias climáticas, uma incorporação que demanda a articulação de setores e saberes tradicionalmente fragmentados no planejamento urbano que historicamente subestima as dinâmicas socioambientais e a participação comunitária

no processo decisório (Jacobi; Sulaiman, 2016; Jacobi, 2023; Aboagye; Sharifi, 2023), bem como a plena compreensão que os impactos das mudanças climáticas é profundamente desigual, intensificando vulnerabilidades sociais e raciais preexistentes (Acselrad *et al*., 2022; Ergene; Banerjee; Ergene, 2024). Tal cenário dialoga com a perspectiva da Ecologia Política de Kontopp (2026), que, ao desnaturalizar conflitos ambientais e evidenciar como processos ecológicos são atravessados por disputas distributivas, territoriais e epistêmicas, oferece instrumental analítico para compreender por que políticas climáticas frequentemente reproduzem ou aprofundam desigualdades pré-existentes - e por que o exame dos processos de construção dessas políticas é indispensável.

Nesse sentido, a justiça climática processual, um dos pilares da justiça climática (Iwama et *al*., 2016; Newell et *al*., 2021), permite analisar os processos da agenda climática a partir da transparência, inclusão e justiça (Newell *et al*., 2021; Abram et *al*., 2022; Lanza Tripoli; Gonçalves-Dias, 2025). A análise a partir dos processos de construção da política climática permite compreender como as estruturas construídas para endereçar a agenda climática contribuem ou prejudicam as populações, sobretudo as mais afetadas pela crise. Os demais pilares - distributiva, reconhecimento e intergeracional - dialogam para o endereçamento da justiça climática (Newell et *al*., 2021), entretanto, iremos focalizar a análise no pilar processual para compreender a atuação do poder público para formação da agenda pública.

Na escala municipal, emblemática por estabelecer contato direto com a capacidade transformativa da sociedade (Wenban-Smith, 2019; Barbi; Rei, 2021; Chu; Shi, 2022; Aboagye, Sharifi, 2023) e impactos múltiplos diante da crise climática (Bader et *al*., 2018; IPCC, 2022; Rocha, 2023), as dificuldades na efetivação da agenda climática orientada pela concepção de justiça climática é ainda mais premente por conta de fatores como a fragmentação setorial das secretarias, a competição por recursos orçamentários e, por vezes, a limitada capacidade institucional para compreender e atuar sobre um tema que demanda abordagens interdisciplinares e inovadoras (Wells; Fuenzalida, 2013). Também há de se ressaltar que nos municípios é visualizado muitas vezes o descompasso entre os prazos políticos (ciclos eleitorais e orçamentários) e a urgência da ação climática (Fleury; Miguel; Taddei, 2019), o que é desafiador quando se considera o objetivo da construção e consolidação de uma política de longo prazo eminentemente participativa. É nesse contexto que a formação de agenda para a justiça climática depende da confluência de múltiplos fatores e atores em uma dinâmica nem sempre linear (Kingdon, 2006), e em que arranjos institucionais multiatores, como comitês intersecretariais, aparecem como estratégia consolidada para auxiliar na elaboração e implementação de políticas climáticas específicas (Barbi; Rei, 2021).

Tendo isso em vista, o município de São Vicente/SP apresenta-se como caso representativo para analisar as contribuições e os desafios de um instrumento voltado para justiça climática, o Comitê Gestor Intersecretarial de Justiça Climática - criado pelo Decreto Nº 6.634/24 - para a formação da agenda climática municipal sob a ótica da Justiça Climática. Como município costeiro da Baixada Santista, sua alta vulnerabilidade a eventos extremos e seus indicadores socioeconômicos que acentuam a fragilidade das comunidades (Araújo et *al*., 2024) demandam respostas políticas que incorporem equidade e participação (Gutierrez; Ferreira, 2023; Di Giulio et *al*., 2017). A análise do instrumento permite não apenas compreender as dinâmicas internas desse arranjo institucional, mas também aferir em que medida ele constitui, ou pode vir a constituir, um espaço de transformação das relações de poder que estruturam a vulnerabilidade climática local. Para isso, o artigo organiza a análise em torno de três dimensões que se articulam ao marco da justiça climática processual: (i) as condições de transparência, inclusão e justiça no funcionamento do Comitê; (ii) a incorporação e abordagem das temáticas de justiça climática nas reuniões; e (iii) os desdobramentos gerados para a agenda climática do município.

Material e Métodos

A pesquisa parte de uma abordagem qualitativa de estudo de caso único e os métodos de observação participante e análise documental a partir de Stake (1999). O autor coloca que o objetivo principal do estudo de caso é a compreensão de determinado contexto e o caso único atende à proposição do projeto voltado para eventos ou situações específicas (Stake, 1999), nesse sentido, as experiências do projeto do Programa de Pesquisa em Políticas Públicas da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (PPPP - FAPESP), o "Co-planejamento para justiça climática no Município de São Vicente: desenvolvimento de ferramentas para tomada de decisão baseada no território com evidências científicas e comunitárias" - aqui sintetizado para Coop Clima - São Vicente, coordenado pela Profª Drª Sylmara Dias, e do Comitê Intersecretarial de Justiça Climática de São Vicente (SP) são objetos do artigo. Os dois métodos empregados permitem a análise de dados primários (1º) (registros a partir da observação participante) e secundários (2º) (atas de reunião e legislação). O Quadro 1 abaixo detalha os dados levantados nesta pesquisa:

Dados	Natureza dos dados	Origem	Qt.
Registros das reuniões do Comitê Intersecretarial de Justiça Climática de São Vicente (SP)	1º	Autores em imersão	10
Atas das reuniões do Comitê Intersecretarial de Justiça Climática de São Vicente (SP)	2º	Secretarias de Meio Ambiente (SEMAM) e de Planejamento e Governança (SEPLAG)	10

Decreto Nº 6.634, de 26 de setembro de 2024	2º	Prefeitura de São Vicente (SP)	1
Resolução CONAMA Nº 511, de 19 de dezembro de 2025	2º	Conselho Nacional de Meio Ambiente no Ministério de Meio Ambiente e Mudança do Clima	1

Quadro 01: Dados coletados. Elaboração própria.

A análise dos dados primários foi realizada a partir das seguintes dimensões: i) justiça climática processual; ii) avaliação de incorporação e abordagem das temáticas em justiça climática; e iii) desdobramentos para a agenda climática do município. Os dados secundários foram empregados na análise de conteúdo de Bardin (1977) com foco nas comunicações identificadas e relacionadas com observações e demais registros possíveis a partir das categorias definidas entre os autores, sendo elas:

- Presença das secretariais, de acordo com o estabelecido no decreto de criação do Comitê;
- Regularidade da lista de presença inicial das atas; e
- Temas abordados.

Resultados e Discussão

A primeira dimensão de análise, justiça climática processual, compreende características de transparência, inclusão e justiça no âmbito do Comitê. Instituído em setembro de 2024, o instrumento tem como finalidade acompanhar e executar o projeto Coop Clima - São Vicente, tendo entre os principais objetivos o de "promover a integração e articulação entre as diversas Secretarias Municipais e demais atores envolvidos no Projeto" (São Vicente, 2024). O Decreto Nº 6.634/24 previu originalmente a composição do Comitê por cinco secretarias: Secretaria de Planejamento e Governança (SEPLAG), Secretaria de Meio Ambiente (SEMAM), Secretaria de Educação (SEDUC), Secretaria de Saúde (SESAU) e Secretaria de Desenvolvimento Social (SEDES). A composição foi alterada posteriormente para inclusão de mais secretarias pelo entendimento de que elas também serão essenciais para a formulação e implementação da política de ação climática no município.

A institucionalização do Comitê resultou do convênio entre a Prefeitura Municipal de São Vicente a Universidade de São Paulo, representando um esforço para transpor as barreiras setoriais comumente verificadas na atuação da gestão pública por meio da integração da pauta climática na formulação de políticas (Araújo; Modesto, 2025). Sua motivação decorre da constatação, na literatura de justiça climática, das dificuldades inerentes à operacionalização dessa concepção nas políticas públicas (Wells; Fuenzalida, 2013; Jacobi; Sulaiman, 2016; Barbi; Rei, 2021; Diezmartínez; Gianotti, 2022; Aboagye; Sharifi, 2023). Nesse contexto, a criação do Comitê reflete uma janela de oportunidade (Kingdon, 2006) que se abriu para a inclusão de uma nova ideia na agenda municipal, facilitada pelo convênio entre academia e poder público. Tal arranjo multiator é essencial para a governança climática local, ao permitir a articulação de diferentes saberes e promoção de uma abordagem mais integrada (Jacobi; Sulaiman, 2016; Barbi; Rei, 2021).

No eixo da transparência, a análise das atas evidencia uma falta de padronização de dados apresentados, ora indicando os participantes e a lista de assinaturas, ora apenas mencionando o participante no momento da fala. As atas não estão disponíveis em portal de acesso público, estando registradas no Sistema Eletrônico de Informações (SEI) do município, com acesso restrito aos servidores municipais. Para pessoas externas à administração pública, como os integrantes da equipe acadêmica do Coop Clima, o acesso requer solicitação direta a servidores ou requisição formal via Lei de Acesso à Informação (LAI), o que configura uma barreira procedimental do ponto de vista da transparência processual. Essa restrição de acesso demandou, no âmbito desta pesquisa, o recurso a anotações dos participantes em imersão e registros fotográficos para confirmação de presença e discussões. Também foi possível constatar que há diferença no detalhamento de informações e encaminhamentos entre as dez atas analisadas. O fato das atas não incluírem a transcrição das discussões, atribuição de atores nas falas e nos encaminhamentos e estabelecerem relações com outras normativas úteis para o Comitê pode indicar que esses registros são insuficientes para contribuir para um movimento por justiça climática na dimensão processual. Um dos desafios notados sobre transparência é a ausência de produção de registros voltados para um amplo entendimento e participação. Fatores como dificuldades na articulação entre secretarias, ausência de atribuição específica para produção dos registros e a compreensão da gestão sobre o instrumento podem estar relacionados com o desafio identificado.

No eixo da inclusão, a análise da presença das secretarias ao longo das dez reuniões demonstra uma participação inconstante. A SEDES esteve ausente nas reuniões 1, 2 e 8; a SEPLAG ausente nas reuniões 7, 8 e 10; a SESAU nas reuniões 3 e 8; sendo que a reunião 8 registrou ausência simultânea de quatro secretarias (SEPLAG, SEDUC, SESAU e SEDES), a menor representatividade institucional do período analisado. Apenas a reunião 9 contou com representantes de todas as secretarias originalmente previstas. A ausência recorrente da SEDES é particularmente significativa à luz da Justiça Climática processual: a secretaria que trabalha diretamente com as populações vulnerabilizadas é justamente aquela com participação inconstante, o que reproduz, no interior do próprio arranjo institucional, criado para enfrentar a desigualdade climática, a lógica de exclusão que se pretende superar. Conforme um dos objetivos mencionados, o Comitê pode trazer outros atores que estão envolvidos com o Coop Clima - São Vicente, entretanto, não foi identificada participação de outros parceiros do projeto como lideranças comunitárias e a juventude da cidade. Destaca-se o processo de construção de oficinas participativas (Oficinas Participativas de Avaliação - OPA!) na construção de inclusão no âmbito do projeto envolvendo a gestão pública. Nas reuniões do Comitê foram definidos diretrizes, calendário e o planejamento para as oficinas com o foco na escuta das populações vulnerabilizadas diante

da crise climática. Apesar da variabilidade de participação das secretarias, a presença constante da equipe acadêmica e da coordenação do projeto na gestão pública contribuiu para o engajamento de servidores, membros e não membros do Comitê, nas atividades de preparação (workshops, trilhas formativas e reuniões de planejamento) e execução das oficinas participativas.

No eixo da justiça, observa-se que a representação da sociedade civil e das comunidades diretamente afetadas não foi prevista no Decreto instituidor do instrumento, que restringe os membros titulares e suplentes a servidores das secretarias municipais (São Vicente, 2024). A participação de atores externos, incluindo pesquisadores do projeto Coop Clima e, nas últimas reuniões, representantes de outras universidades e conselhos, ocorreu por convite dos conselheiros, sem deliberação formal. Nesse sentido, o Comitê se configura, em sua composição formal, como um arranjo intragovernamental, cuja abertura à participação social é discricionária e depende da iniciativa dos membros. Isso dialoga com a perspectiva de Kontopp (2026) sobre os riscos de captura institucional em arranjos que, embora formulados em linguagem de co-construção, mantêm o controle decisório concentrado no aparato estatal, afastando-se do horizonte deliberativo da justiça climática. A partir das discussões registradas, compreende-se que um novo instrumento está previsto para consulta e deliberação com a presença da sociedade civil e Organizações da Sociedade Civil (OSCs) na sua composição institucional. O atual instrumento, portanto, recebe atribuições distintas dessa nova configuração conforme avançam as discussões sobre a política e o plano de ação climática da cidade.

A segunda dimensão de análise permite examinar se o Comitê, criado explicitamente sob o aspecto da justiça climática, efetivamente pauta e opera a partir desse conceito em seus encontros. A análise dos temas abordados nas dez reuniões revela que os avanços se expressam na progressiva ampliação do escopo temático ao longo do período. A partir da terceira reunião, o Comitê avançou além dos temas operacionais do projeto (como letramento e mapeamento de atores) para questões estruturantes como a criação de uma frente parlamentar, a inclusão da justiça climática no Plano Plurianual (PPA) e articulação com o Conselho Estadual de Mudanças Climáticas. Na sétima reunião, a apresentação do caso Rhodia - empresa associada à contaminação de área continental de São Vicente, com impactos estimados sobre 150 mil pessoas - introduziu, de forma concreta e a partir de um ator interno à gestão (servidor da SESAU), a dimensão do racismo ambiental (Ergene; Banerjee; Ergene, 2024) na pauta do Comitê, materializando o conceito de justiça climática no território e em corpos afetados. No entanto, também são visíveis tensões, sugerindo "desvio de tema" recorrente: em diversas reuniões, temas de meio ambiente em geral, como resíduos sólidos, contaminação e arborização, e questões operacionais do projeto Coop Clima dominaram a pauta em detrimento de discussões substantivas sobre justiça climática. Essa tensão se aproxima do que Jacobi (2023) identifica como a persistência de uma perspectiva técnica e setorial que, mesmo quando acomodada em arranjos institucionais, tende a tratar a questão climática como problema ambiental-operacional, e não como problema político-distributivo. É importante mencionar que as discussões no Comitê partem da sua estrutura de acompanhamento da execução do projeto, portanto, este é um fator norteador e também limitador do ponto de vista da justiça climática processual, uma vez que somente um espaço institucional pode não ser suficiente para endereçar as discussões e atividades envolvendo a agenda de justiça climática.

A terceira dimensão de análise, desdobramentos para a agenda climática do município, permite avaliar a capacidade do Comitê de gerar continuidade e transformação na política climática local. A partir da análise cruzada entre os encaminhamentos registrados nas atas e seus desdobramentos posteriores, foi possível identificar itens pontuais e outros com diferentes continuidades. Entre os desdobramentos com continuidade efetiva estão atividades planejadas durante as reuniões e atividades propostas pela equipe acadêmica. Entre as primeiras, destaca-se a construção coletiva de um protocolo para as oficinas participativas que resultou em onze oficinas, em sua maioria realizadas em escolas em territórios vulnerabilizados, divulgadas no Boletim Oficial do Município e com materiais de divulgação compartilhados nas redes sociais e no site da prefeitura e do Coop Clima - São Vicente. As oficinas resultam em uma segunda onda de desdobramentos para endereçar o que foi identificado e discutido por diferentes grupos sociais que se encontram em vulnerabilidade diante da crise climática, como grupos de trabalho com equipes mistas entre gestão pública e academia e atividades de divulgação para públicos amplos. Das atividades propostas pela equipe universitária, cabe mencionar as reuniões com metodologias ativas para construir as oficinas participativas, formações sobre temas relacionados à justiça climática como racismo ambiental, desigualdade de gênero e etarismo e atividades de letramento climático com diferentes públicos em parceria, principalmente, com a SEPLAG e a SEDUC. Com o aumento de atividades que envolveram outros grupos e atores do município, é possível compreender que o alcance do projeto e a identificação da pauta por justiça climática também foram ampliados. Dessa forma, o engajamento da gestão pública a partir do instrumento analisado pode ser visto como um primeiro círculo que se desdobra para a agenda climática de São Vicente, seguido por um segundo círculo que envolve as lideranças comunitárias que dialogam com o Coop Clima, participantes das oficinas participativas e demais pessoas que tiveram contato com materiais de divulgação, exposições e demais atividades planejadas no âmbito do Comitê. As discussões do instrumento indicam, ainda, um terceiro círculo que mobilize a população para construir coletivamente a política e o plano municipal voltado para o clima (Figura 1).



Figura 01: Círculos de engajamento para agenda climática do município a partir do Comitê Intersecretarial por Justiça Climática. Elaboração própria.

Ao mesmo tempo, itens significativos não tiveram continuidade ou tiveram continuidade parcial. A proposta de palestra com especialista em saúde sobre efeitos do calor, deliberada na oitava reunião, não foi retomada nas reuniões seguintes. O planejamento do II Fórum Coop Clima, discutido nas reuniões 7 e 9, ficou sem continuidade de planejamento formal. A ação de letramento em arborização urbana, articulada entre SEMAM e SEDUC na nona reunião, avançou pouco apesar do interesse manifestado pelas secretarias. Esse padrão de descontinuidade seletiva é coerente com o diagnóstico de Fleury, Miguel e Taddei (2019) sobre o descompasso entre ciclos políticos e urgência climática: os encaminhamentos que persistem são os que encontram atores institucionais ativos; os que dependem de articulação multissetorial sem âncora específica tendem a diluir-se. Fatores como as dinâmicas de poder dentro da gestão pública e da universidade, alteração constante da agenda do projeto e das secretarias e flexibilidade do planejamento devido ao seu caráter de co-construção e participação de diferentes atores podem contribuir para compreender quais pautas recebem desdobramento contínuo e quais são descontinuadas, também podem contribuir para qualificar a agenda climática sob a ótica da justiça climática processual.

Comentários finais

A análise permitiu compreender as principais contribuições e desafios do Comitê Intersecretarial de Justiça Climática de São Vicente (SP) para a agenda climática local. Primeiro, o instrumento é visto como uma janela de oportunidade fomentada pelo acordo técnico entre a prefeitura e a universidade, reduzindo as barreiras entre o meio científico e o de formulação e implementação de políticas públicas e contribuindo para a articulação entre diferentes saberes e a formação de uma nova ideia de agenda municipal. A partir das dimensões, os principais resultados são:

I) Justiça climática processual: a) Transparência: dificuldade na produção regular e divulgação dos registros das reuniões; b) Inclusão: dificuldade da participação regular das secretarias nas reuniões e discussão sobre justiça climática e inclusão de grupos sociais vulnerabilizados; c) Justiça: estrutura norteadora e limitante do instrumento;

II) Avaliação de incorporação e abordagem das temáticas em justiça climática: avanço no escopo temático com a gestão pública, desvios temáticos e indicativos de endereçar a questão climática como problema ambiental-operacional;

III) Desdobramentos para a agenda climática do município: itens com continuidade efetiva (oficinas participativas, formações e trilhas formativas), com continuidade parcial ou sem continuidade (palestras, atividades de letramento e planejamento).

Dessa forma, o instrumento é permeado pelas relações de poder dentro da gestão pública e da universidade e as contribuições para a agenda climática da cidade dependem da mobilização para atividades com maior alcance para grupos da sociedade civil, sobretudo os mais vulnerabilizados diante da crise climática. A articulação entre secretarias, produção de registros adequados e sua ampla divulgação e o diálogo entre diferentes atores são os principais desafios identificados no instrumento para que se enderece o movimento por justiça climática na cidade de São Vicente.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), ao qual agradecemos pelo financiamento do projeto de pesquisa nº. 2023/10280-2: Co-planejamento para justiça climática no município de São Vicente: desenvolvimento de ferramentas para tomada de decisão baseada no território com evidências científicas e comunitárias. Com apoio da FAPESP. Processo nº 202501259-5. Com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal

de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências Bibliográficas

ABOAGYE, Prince Dacosta; SHARIFI, Ayyoob. Post-fifth assessment report urban climate planning: Lessons from 278 urban climate action plans released from 2015 to 2022. **Urban Climate**, v. 49, p. 101550, 2023.

ABRAM, S., ATKINS, E., DIETZEL, A., JENKINS, K., KIAMBA, L., KIRSHNER, J., … SANTOS AYLLÓN, L. M. Just Transition: A whole-systems approach to decarbonisation. **Climate Policy**, v. 22(8), p. 1033–1049, 2022. DOI: https://doi.org/10.1080/14693062.2022.2108365

ACSELRAD, Henri et al. O "social" nas mudanças climáticas. **Liinc em Revista**, v. 18, n. 1, p. e5930-e5930, 2022.

ARAÚJO, Gabriel Pires de. et al. Justiça climática e as múltiplas dimensões de vulnerabilidades nos municípios de zona costeira: o caso de São Vicente (SP). In: GONÇALVES, L. R.; ARRUDA FILHO, M. T.; TORRES, P. H. C. (Orgs.). **Justiça climática em regiões costeiras no Brasil**. Editora Paco: Jundiaí, 2024, p. 13-44.

ARAÚJO, Gabriel Pires de; MODESTO, Mayara de Souza. AGENDA DA JUSTIÇA CLIMÁTICA EM SÃO VICENTE: DESAFIOS NA GESTÃO LOCAL.. In: **Anais do XII Enanppas 2025**. São Paulo(SP) Universidade de São Paulo, 2025. Disponível em: https//www.even3.com.br/anais/enanppas-2025/1216816-AGENDA-DA-JUSTICA-CLIMATICA-EM-SAO-VICENTE--DESAFIOS-NA-GESTAO-LOCAL. Acesso em: 30/03/2026.

BADER, D. A., BLAKE, R., GRIMM, A., HAMDI, R., KIM, Y., HORTON, R., AND ROSENZWEIG, C. Urban climate science. In: ROSENZWEIG, C., W. SOLECKI, P. ROMERO-LANKAO, S. MEHROTRA, S. DHAKAL, AND S. ALI IBRAHIM (eds.). **Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network**. Cambridge University Press. New York. p. 27–60, 2018.

BARDIN, L. Análise de conteúdo. Lisboa: Edições 70, 1977.

BARBI, Fabiana; REI, Fernando Cardozo Fernandes. Mudanças climáticas e agenda de adaptação nas cidades brasileiras. **Revista Catalana de Dret Ambiental**, v. 12, n. 1, 2021.

BRASIL. Conama aprova resolução histórica sobre justiça climática e combate ao racismo ambiental. **Assessoria Especial de Comunicação Social do MMA**, Brasília, 04 dez. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/conama-aprova-resolucao-historica-sobre-justica-climatica-e-combate-ao-racismo-ambiental. Acesso em: 07 jan. 2026.

CHU, E.; SHI, L. Urban Climate Adaptation: Discontents and Alternative Politics. In: SOWERS, J.; VANDEVEER, S. D.; WEINTHAL, E. (eds). **The Oxford handbook of comparative environmental politics**. Oxford: Oxford Academic, 14 jul. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780197515037.013.27. Acesso em: 09 dez. 2024.

DI GIULIO, Gabriela Marques et al. Mudanças climáticas, riscos e adaptação na megacidade de São Paulo, Brasil. **Sustainability in Debate/Sustentabilidade em Debate**, v. 8, n. 2, 2017.

DIEZMARTÍNEZ, Claudia V.; SHORT GIANOTTI, Anne G. US cities increasingly integrate justice into climate planning and create policy tools for climate justice. **Nature communications**, v. 13, n. 1, p. 5763, 2022.

ERGENE, Seray; BANERJEE, Subhabrata Bobby; ERGENE, Erim. Environmental racism and climate (In)justice in the anthropocene: Addressing the silences and erasures in management and organization studies. **Journal of Business Ethics**, v. 193, n. 4, p. 785-800, 2024.

FLEURY, Lorena Cândido; MIGUEL, Jean Carlos Hochsprung; TADDEI, Renzo. Mudanças climáticas, ciência e sociedade. **Sociologias**, v. 21, p. 18-42, 2019.

FRANCHINI, M.; MAUAD, A. C. E.; VIOLA, E. De Lula a Bolsonaro: Una década de degradacíon de la gobernanza climática en Brasil. **Análisis Político**, v. 33, n. 99, p. 81-100, 2020.

GUTIERREZ, Eduardo P.; FERREIRA, Leila da C. Capítulo 23: Governança Climática e Amplificação Social do Risco em Santos-SP: uma análise entre 2015 e 2022. In: IWAMA, Allan Yu; AGUILAR-MUÑOZ, Viviana; BARBI, Fabiana (Orgs.). **Riscos ao Sul: Diversidade de Riscos de Desastres no Brasil**. Edição especial Riesgos al Sur de La Red. Ubatuba, SP: Editora Isso dá um livro, 2023. E-book. ISBN 978-65-994944-3-7. 623 p. Disponível em: http://www.riesgosalsurbrasil.org/conteudo.html.

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., 2022. doi:10.1017/9781009325844.

IWAMA, A. Y. et al.. RISK, VULNERABILITY AND ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE: AN INTERDISCIPLINARY APPROACH. **Ambiente & Sociedade**, v. 19, n. 2, p. 93–116, abr. 2016.

JACOBI, Pedro. Desafios da governança ambiental urbana face à emergência climática. **Cadernos de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo**, v. 23, n. 1, p. 9-20, 2023.

JACOBI, Pedro Roberto; ARRUDA FILHO, Marcos Tavares de; PIERRO, Bruno de. Ambiente e Sociedade em Tempos de Emergência Climática: Do Resgate Histórico ao Momento Atual. **Fronteira: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 35–46, 2022. DOI: 10.21664/2238-8869.2022v11i3. Disponível em: https://periodicos.unievangelica.edu.br/index.php/fronteiras/article/view/6518. Acesso em: 3 maio. 2026.

JACOBI, Pedro Roberto; SULAIMAN, Samia Nascimento. Governança ambiental urbana em face das mudanças climáticas. **Revista USP**, n. 109, p. 133-142, 2016.

KINGDON, John W. Como chega a hora de uma ideia? In: SARAVIA, E.; FERRAREZI, E. (Org.). **Políticas públicas: coletânea**. Brasília: ENAP, 2006. v. 1, p. 219-247.

KONTOPP, Marcio Anderson. Ecologia Política e Estado: ontologia relacional e implicações para as políticas públicas. **Revista PPC – Políticas Públicas e Cidades**, Curitiba, v. 15, n. 3, p. 01-15, 2026.

LANZA TRIPOLI, Marcela; GONÇALVES-DIAS, Sylmara. Justiça climática, como e onde é estudada: revisão sistemática de uma década. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 66, p. 337–366, 2025. DOI: 10.5380/dma.v66i.94825. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/made/article/view/94825. Acesso em: 3 maio. 2026.

MENEZES, R. G.; BARBOSA JR., R. Environmental governance under Bolsonaro: dismantling institutions, curtailing participation, delegitimising opposition. **Zeitschrift für vergleichende politikwissenschaft**, v. 15, p. 229-247, 2021.

NEWELL, P.; SRIVASTAVA, S.; NAESS, L.O.; CONTRERAS, G.A.T.; PRICE, R. Toward transformative climate justice: An emerging research agenda. **WIREs Climate Change**, 12, 2021.

ROCHA, J. D. Capítulo 12 - Adaptação Das Cidades Costeiras Brasileiras Receptoras De Impactos Do Aquicimento Global. In: PÊGO, B.; NEGAMINE, L.; KRÜGER, C.; MOURA, R. (orgs.). **Fronteiras Do Brasil: O Litoral Em Sua Dimensão Fronteiriça**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2023, v. 8, cap. 12, p. 323-346.

SÃO VICENTE (SP). Decreto nº 6.634, de 26 de setembro de 2024. Institui o Comitê Gestor Intersecretarial de Justiça Climática para execução e acompanhamento do Convênio nº 1017317-2024 celebrado entre a Prefeitura Municipal de São Vicente e a Universidade de São Paulo. São Vicente: Prefeitura Municipal, 2024.

SCHLOSBERG, D. and COLLINS, L.B. From environmental to climate justice: climate change and the discourse of environmental justice. **WIREs Climate Change**, v. 5, p. 359-374, 2014. DOI: https://doi.org/10.1002/wcc.275.

STAKE, R. E. Qualitative Case Studies. In: DENZIN, N. K.; LINCOLN, Y. S. (ed.). **Handbook of Qualitative Research**. Thousand Oaks: Sage Publications, 2nd ed., 2000, p. 443-466.

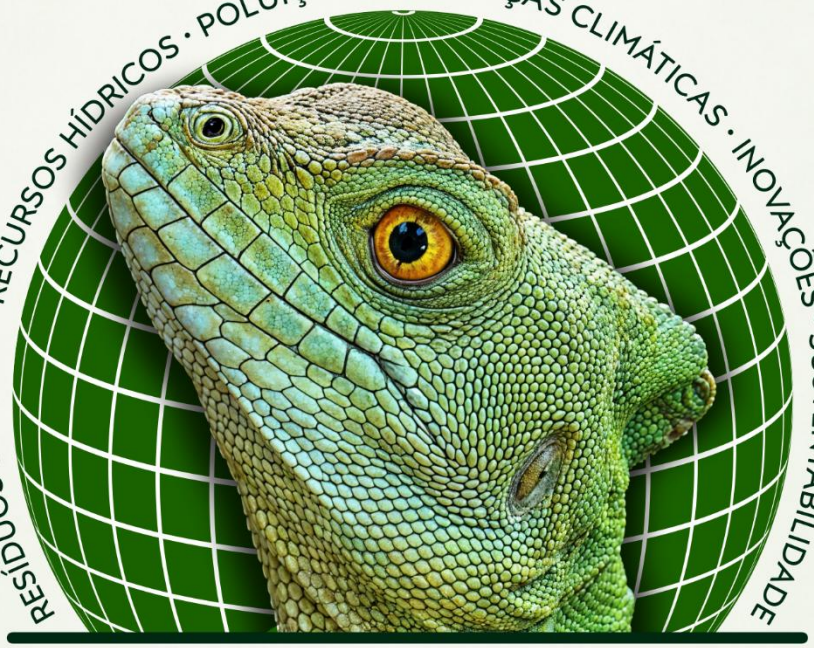
SULTANA, Farhana. The unbearable heaviness of climate coloniality. **Political Geography**, v. 99, p. 1-14, 2022.

WELLS, Gustavo Blanco; FUENZALIDA, María Ignacia. La construcción de agendas científicas sobre cambio climático y su influencia en la territorialización de políticas públicas: reflexiones a partir del caso chileno. **Cambio climático, movimientos sociales y políticas públicas**. Una vinculación necesaria, p. 77-104, 2013.

WENBAN-SMITH, H. B. Economies of scale, distribution costs and density effects in urban water supply: a spatial analysis of the role of infrastructure in urban agglomeration. 2009. Tese (Doutorado em Filosofia) - London School of Economics and Political Science, Londres, 2009.

ÁREA TEMÁTICA 12

HIDROSSEDIMENTOLOGIA



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

ANÁLISE DA VARIABILIDADE HIDROLÓGICA LONGITUDINAL E DISPONIBILIDADE HÍDRICA A JUSANTE: O CASO DA UHE ITIQUIRA (MT)

1 Rose Mary Teixeira de Lemos, 2 Renato Billia de Miranda, 3 Frederico Fábio Mauad
1 Universidade de São Paulo - USP, roseteixeiralemos@gmail.com; 2 Universidade de São Paulo USP, eng.renato.miranda@gmail.com; 3 Universidade de São Paulo - USP, mauadffm@sc.usp.br

Palavras-Chave: Assoreamento; Reservatórios a fio d'água; UHE-Itiquira

Resumo

A estimativa confiável da disponibilidade hídrica em bacias com alta dinâmica sedimentar, como a sub-bacia do rio Itiquira (MT), é fundamental para a gestão de reservatórios e a conservação de ecossistemas sensíveis a jusante. Este estudo apresenta um diagnóstico hidrossedimentológico preliminar da UHE Itiquira, operando sob regime a fio d'água, com foco na avaliação da variabilidade longitudinal das vazões de permanência (Q_{90} e Q_{95}). Utilizando séries históricas (2004 – 2023) provenientes do portal HidroWeb/ANA, os dados foram processados no *software* Hidro 1.4 e analisados em ambiente Excel para a construção de curvas-chave e cálculos estatísticos. Os resultados revelam uma divergência hidrológica longitudinal: enquanto a vazão média (Q_{50}) apresentou incremento marginal de 3,7%, as vazões de permanência crítica (Q_{95}) sofreram redução de 15,6% a jusante. Este cenário é agravado pelo aumento de 41,70 m^3/s no desvio padrão da Q_{95}, evidenciando que a operação e o assoreamento não apenas reduzem a disponibilidade hídrica mínima, mas elevam a volatilidade do regime hídrico, sinalizando maior volatilidade e instabilidade do regime hídrico. Tais evidências indicam que o assoreamento consolidado e o fenômeno de *shifting control* comprometem a segurança hídrica do Pantanal em períodos de estiagem, como observado no evento extremo de 2021. Conclui-se que a integração desses diagnósticos a modelos preditivos de inteligência artificial é essencial para a otimização das manobras de manejo de sedimentos *(sluicing*) e mitigação de impactos ambientais**.**

Introdução

O assoreamento de reservatórios constitui um dos principais desafios para a operação e a gestão de usinas hidrelétricas, especialmente em empreendimentos operando sob regime a fio d'água (Reisenbüchler *et al.* 2020). Nestes sistemas, a dinâmica sedimentar é intrinsecamente vinculada à variabilidade do regime hidrológico longitudinal, tornando a consistência das estimativas de vazão o pilar central para qualquer avaliação hidrossedimentológica precisa. Nesse contexto, a estabilidade da relação cota-vazão assume papel central, sendo frequentemente comprometida por processos de agradação e degradação do leito que invalidam as curvas-chave tradicionais (Rojas *et al.*, 2020; Mailhot *et al.*, 2025; Maldonado *et al*., 2024)

O presente trabalho tem como objetivo realizar um diagnóstico da variabilidade hidrológica e da disponibilidade hídrica a jusante na UHE Itiquira (MT), empreendimento estratégico situado na Bacia do Alto Paraguai, região de elevada sensibilidade ambiental e tributária, vital para o bioma Pantanal (Fantin-Cruz *et al.,* 2020). A pesquisa fundamenta-se na construção e avaliação de curvas-chave em estações fluviométricas associadas ao reservatório, utilizando dados históricos de nível e vazão provenientes da base HidroWeb (ANA, 2026). A construção e validação de relações cota-vazão são procedimentos metodológicos consagrados na literatura hidrológica (Rantz, 1982; Mailhot *et al.*, 2025), mas frequentemente enfrentam dificuldades devido a inconsistências e lacunas nas séries observadas (Di Baldassarre & Montanari, 2009; Hirsch *et al*., 1991). Tais discrepâncias têm implicações diretas para a análise do assoreamento, uma vez que a incerteza nas estimativas de descarga influencia a quantificação de transporte de sedimentos (Knighton, 2014), assim como para a garantia da manutenção do regime hídrico necessário aos ecossistemas de jusante (Foley *et al.*, 2017).

Material e Método

A área de estudo abrange a UHE Itiquira, situada no estado de Mato Grosso (MT), em uma das principais sub-bacias formadoras da Bacia do Alto Paraguai (BAP). Conforme o Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai (PCBAP-1997), o rio Itiquira possui suas nascentes no município de Alto Garças (MT), com cotas altimétricas entre 900 e 980 metros, inseridas no setor do Planalto do Taquari – Itiquira (Figura 01).

A seleção desta unidade para a pesquisa fundamentou-se na problemática consolidada do assoreamento do reservatório, aliada à disponibilidade de uma base de dados hidrossedimentológica robusta, atual e consistente. Tais características geográficas e informacionais conferem à UHE Itiquira as condições ideais para o desenvolvimento da modelagem preditiva e da análise rigorosa dos processos de transporte de sedimentos e da disponibilidade hídrica pretendidos. A relevância deste estudo reside no fato de que usinas a fio d'água são frequentemente consideradas de baixo impacto hidrológico. Contudo, a interação entre a gestão de sedimentos e a manutenção de vazões ecológicas em biomas sensíveis, como o Pantanal, permanece uma lacuna crítica na literatura técnica nacional.

A estimativa da disponibilidade hídrica na bacia do rio Itiquira (MT) enfrenta desafios analíticos impostos pela intensa dinâmica hidrossedimentológica, que compromete a estabilidade da relação cota-vazão e a conformidade com a curva-chave. O fenômeno de *shifting control*, decorrente de processos de agradação e degradação do leito, aliado ao efeito de histerese (*Loop Rating Curve*), exige um tratamento rigoroso das séries históricas para mitigar as incertezas nas métricas de permanência. Nesse contexto, a metodologia adotada prioriza a análise da consistência dos dados fluviométricos e pluviométricos em estações estratégicas, considerando que variações na geometria da seção transversal e na linha de energia podem induzir erros significativos no cálculo

das vazões de projeto. O estudo desenvolveu uma análise comparativa longitudinal entre as seções de montante e jusante da UHE Itiquira, visando quantificar as alterações nas vazões de permanência Q_{90} e Q_{95} sob a influência de operações a fio d'água. A abordagem integra variáveis hidrológicas, sedimentológicas e operacionais para isolar o impacto do barramento e dos ajustes operacionais de curto prazo sobre o regime de vazões mínimas. Esta sistematização multivariável provê a base observacional necessária para o desenvolvimento de uma modelagem preditiva, focada na otimização das manobras de manejo de sedimentos (*sluicing*) e na garantia da manutenção do aporte hídrico para o ecossistema sensível do Pantanal.

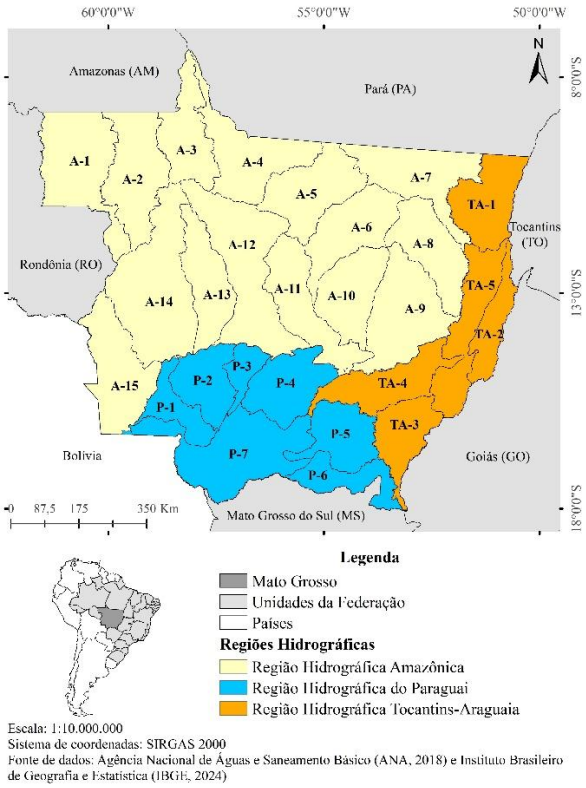


Figura 01: Distribuição das Bacias Hidrográficas no Estado de Mato Grosso, ilustrando a localização da sub-bacia hidrográfica do rio Itiquira (P-6)
Fonte: Autores

A base de dados primária foi constituída por séries históricas de níveis (H) e vazões (Q) extraídas do portal HidroWeb, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), abrangendo o período de 2004 a 2023. O processamento inicial, consistência e organização das séries foram realizados no *software* Hidro 1.4 (ANA), permitindo a análise de tendências e a estruturação de arquivos para o cálculo de curvas de permanência.

A etapa crítica de construção e ajuste das curvas-chave foi executada integralmente em ambiente Microsoft Excel. Para cada estação, montante (estações 1.754.017 e 66.522.000); e jusante (estações 01.754.018 e 66.525.100). Os dados de nível e vazão foram correlacionados para a obtenção das equações de regressão que definem a relação cota-vazão. Esse procedimento permitiu converter os registros de níveis diários em vazões, garantindo a continuidade da série histórica e permitindo a análise de períodos com lacunas de medição direta, como o ciclo de seca de 2010/2011. Com as séries de vazão consolidadas, o *software* Excel foi utilizado para o cálculo das estatísticas de permanência (Q_{50}, Q_{90} e Q_{95}), do desvio padrão amostral e das variações longitudinais (ΔQ). Complementarmente, os dados de precipitação permitiram a determinação da média mensal e da frequência de dias chuvosos, auxiliando na interpretação da sazonalidade. A Diferença (ΔQ), representando o impacto longitudinal, foi analisada sob duas perspectivas distintas:

A primeira métrica baseia-se na variação relativa da vazão, representando a oscilação percentual dos volumes hídricos entre o ponto de entrada (montante) e o ponto de saída (jusante). Esse tipo de comparação entre seções fluviais é amplamente utilizado em análises hidrológicas para identificar ganhos ou perdas de volume ao longo do sistema (Tucci, 2009). No contexto da UHE Itiquira, este indicador quantifica as variações de vazão no trecho estudado, sendo calculado conforme a Equação 1.

$$(\Delta Q)\% = \frac{Q_{Jusante} - Q_{Montante}}{Q_{Montante}} * 100 \quad \text{(Eq. 1)}$$

Onde: ΔQ = variação relativa da vazão (%); $Q_{Montante}$ = Vazão média observada a montante do reservatório (m³/s); $Q_{Jusante}$ = vazão média observada a jusante do reservatório (m³/s)

A segunda métrica baseia-se no cálculo da incerteza combinada das medições de vazão, com o objetivo de avaliar a propagação da variabilidade estatística entre as estações hidrométricas. Para isso, foi aplicado o método da soma quadrática, baseado na propagação de erros de Gauss, assumindo independência estatística entre as variáveis.

Diferentemente do cálculo da variação relativa da vazão, o desvio padrão da diferença (σΔ) foi mantido em unidade absoluta (m³/s), representando a amplitude total de oscilação do sistema hidrológico. O cálculo foi realizado conforme a Equação 2:

$$\sigma\Delta = \sqrt{\sigma^2_{montante} + \sigma^2_{jusante}} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

Onde: σΔ = desvio padrão da diferença entre as vazões; $\sigma_{montante}$ = desvio padrão da vazão observada na estação a montante; $\sigma_{jusante}$ = desvio padrão da vazão observada na estação a jusante

Esta metodologia permitiu um controle rigoroso sobre os ajustes matemáticos das curvas, essencial para identificar o fenômeno de *shifting control e* correlacionar a variabilidade do regime hídrico com o processo de assoreamento observado no reservatório e seus impactos a jusante.

Resultados e Discussão

A sub-bacia hidrográfica do rio Itiquira desempenha um papel ecossistêmico vital, contribuindo com afluentes significativos em sua margem esquerda para a rede de drenagem que alimenta a planície inundável do Pantanal Matogrossense. As nascentes do rio Itiquira localizam-se no município de Alto Garças (MT), em um setor de transição geológica e geomorfológica conhecido como Planalto do Taquari – Itiquira, com cotas altimétricas entre 900 e 980 metros. Esta configuração do relevo é determinante para a dinâmica hidrossedimentológica da região, uma vez que a declividade acentuada nas cabeceiras favorece o transporte de sedimentos que, posteriormente, atingem o reservatório da UHE Itiquira e a planície pantaneira a jusante.

A área de estudo específica concentra-se no aproveitamento hidrelétrico operado pela empresa Elera Renováveis S.A. (originalmente outorgado à Itiquira Energética S.A.), sob o regime de concessão pelo Contrato nº 213/1998 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A Resolução Autorizativa nº 12.621/2022 da ANEEL oficializou a transferência de titularidade da concessão da UHE Itiquira para a Elera Renováveis S.A., estabelecendo os termos sob os quais a nova concessionária assume a operação da usina hidrelétrica. A seleção da UHE-Itiquira justifica-se tecnicamente pela presença de um reservatório com problemática consolidada de assoreamento, que dispõe de uma base de dados hidrossedimentológicos robusta e atual, condições consideradas ideais para a análise científica dos processos de transporte de sedimentos e disponibilidade hídrica. A UHE-Itiquira opera sob o regime de fio d'água, configuração que implica baixa capacidade de regularização de vazões e torna a operação altamente dependente da variabilidade hidrológica natural e da dinâmica de transporte sólido (ELERA RENOVÁVEIS, 2024).

O enchimento do reservatório Itiquira iniciou-se em agosto de 2002, sendo o primeiro registo de nível da água do reservatório informado em 22/10/2002; e o início da geração ocorreu em outubro de 2002. Em novembro e dezembro de 2002, entraram em funcionamento, respectivamente, as unidades geradoras 1 e 3. Finalmente, em janeiro de 2003, entrou em operação a unidade de geração 4 (ONS).

A análise do hidrograma de vazões médias diárias da UHE Itiquira, no período de 2004 a 2023, evidencia a estreita relação entre eventos hidrológicos extremos e a dinâmica de assoreamento do reservatório a fio d'água (Figura 02). Destaca-se, inicialmente, o evento de seca registrado no biênio 2010 - 2011, que foi marcado por estiagens que comprometeram o ciclo de cheias no Pantanal seguido por picos expressivos de vazão. Tais picos atuam como principal mecanismo de mobilização e transporte de sedimentos (suspensão e de fundo). A ocorrência de vazões elevadas, associada às lacunas de dados no período, sugere um regime hidrodinâmico altamente energético, capaz de intensificar processos erosivos a montante e promover o aporte significativo de material sólido ao reservatório (Cássia Ramos, 2020). Nessas condições, o encontro do pulso de cheia com o remanso hidráulico provoca uma redução abrupta da velocidade do escoamento, favorecendo a deposição preferencial de sedimentos grosseiros no trecho superior do reservatório e acelerando o processo de agradação do leito.

Como consequência, é plausível a ocorrência de instabilidade na relação cota – vazão a partir desse evento, configurando um cenário típico de *shifting control*, no qual a alteração da geometria da seção transversal compromete a validade das curvas-chave previamente calibradas.

Em contraste, o ano de 2021 apresenta um regime hidrológico marcado por vazões persistentemente baixas e pouco variáveis, situando-se abaixo da Q_{95} histórica calculada para o período (2004-2023). Esta persistência em níveis críticos demonstra que o assoreamento não apenas reduz o volume útil, mas atua como um catalisador da severidade hidrológica a jusante, limitando a resiliência do ecossistema pantaneiro e refletindo um estado de estresse hídrico acentuado.

Sob tais condições, a reduzida energia do escoamento limita a capacidade de "autolimpeza" do canal, impedindo a remobilização dos sedimentos acumulados na década anterior e contribuindo para a consolidação do assoreamento. Durante a recessão prolongada observada em 2021, o rearranjo do material sedimentar depositado pode ainda induzir efeitos de histerese na relação cota – vazão (*loop rating curve*), dificultando a estimativa precisa das vazões mínimas necessárias à manutenção dos processos ecológicos associados ao Pantanal. Assim, o hidrograma revela não apenas a variabilidade hidrológica interanual, mas os impactos cumulativos dos extremos hidrológicos sobre a morfodinâmica fluvial e a confiabilidade das medições hidrométricas na área de influência do empreendimento.

Observando a série histórica (2004 - 2023) com relação à análise da variabilidade hidrometeorológica e da dinâmica de sedimentos, revelam-se uma forte sazonalidade e correlação entre os índices pluviométricos e o regime de vazões, fatores determinantes na dinâmica hidrossedimentológica da bacia. Na figura 03, em que as estações estão localizadas a montante, o gráfico A evidência que a concentração da precipitação e o maior número de dias chuvosos ocorrem entre os meses de outubro e março,

período em que o potencial de erosão hídrica e transporte de sedimentos é maximizado. Conforme observado no gráfico da Figura 03 (B), a resposta hidrológica é imediata, com as vazões médias atingindo picos superiores a 90 m3/s no primeiro trimestre, coincidindo com os eventos de cheia (como o registrado em 2010/2011) que promovem o aporte massivo de material sólido para o reservatório. Considerando que a UHE Itiquira opera sob o regime de fio d'água, essa flutuação sazonal impacta diretamente a capacidade de autolimpeza do sistema. Durante os meses de estiagem (junho a setembro), em que a precipitação é mínima e as vazões recuam para patamares próximos à Q_{95} (abaixo de 50 m3/s), a baixa competência do fluxo favorece a consolidação dos sedimentos depositados durante as cheias, agravando o assoreamento. Este comportamento cíclico impõe desafios à gestão das vazões de permanência, uma vez que a redução da calha útil pelo acúmulo de sedimentos pode alterar a propagação das ondas de cheia e a manutenção dos níveis críticos necessários para a integridade ecológica do Pantanal situado a jusante.

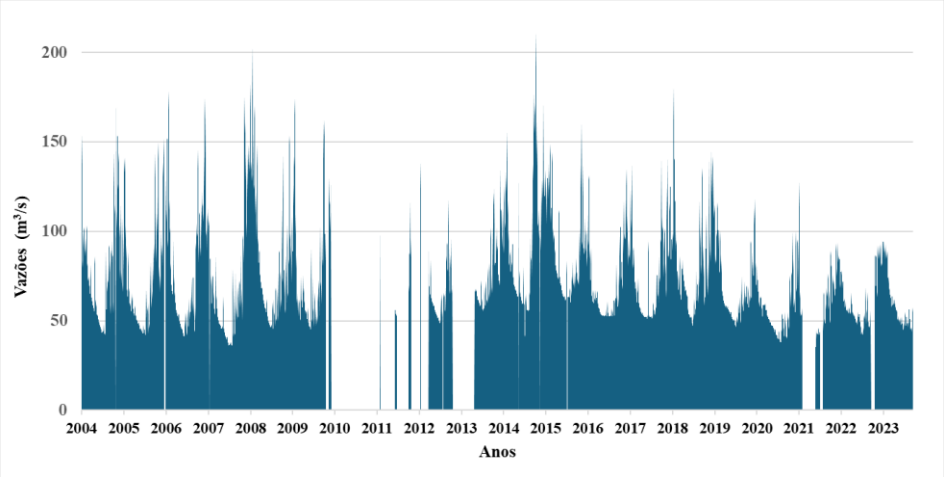


Figura 02: Hidrograma de vazões médias diárias observadas na estação 66.522.000 (Montante), evidenciando a variabilidade hidrológica interanual e a ocorrência de eventos de cheia e estiagem entre 2004 e 2023. Fonte: Hidroweb (2026)

A análise das séries temporais nas estações situadas a jusante da UHE Itiquira revela a manutenção do sincronismo entre os índices pluviométricos e o regime de vazões, consolidando o padrão de resposta rápida da bacia aos eventos climáticos. Conforme observado na Figura 03, gráfico A, a distribuição da precipitação média mensal e o número de dias chuvosos (período 2003 – 2023) estabelecem o potencial de carga sedimentar que transita pelo sistema. Durante o primeiro trimestre, o acoplamento entre a precipitação máxima e as vazões médias elevadas (excedendo 100 m^3/s, Figura 03, gráfico B) define a fase de maior transporte sólido, essencial para a manutenção dos pulsos de inundação no ecossistema do Pantanal. Entretanto, a comparação entre as séries históricas indica que eventos de magnitude extrema, como a cheia de 2010/2011, geram impactos morfológicos que perduram por ciclos hidrológicos subsequentes. Nestas seções a jusante, o fenômeno de *shifting control* é exacerbado pela deposição de sedimentos que não foram retidos no reservatório, alterando a estabilidade da curva-chave. Durante o período de recessão, evidenciado na Figura 03, gráfico B entre os meses de junho e setembro, as vazões aproximam-se dos limites de permanência Q_{90} e Q_{95}. Sob o regime de fio d'água, a baixa competência do fluxo em anos secos, como o verificado em 2021, favorece a agradação do leito, o que pode comprometer a precisão das medições de vazões mínimas e afetar a regularidade do aporte hídrico necessário para a conservação da biodiversidade na planície inundável pantaneira.

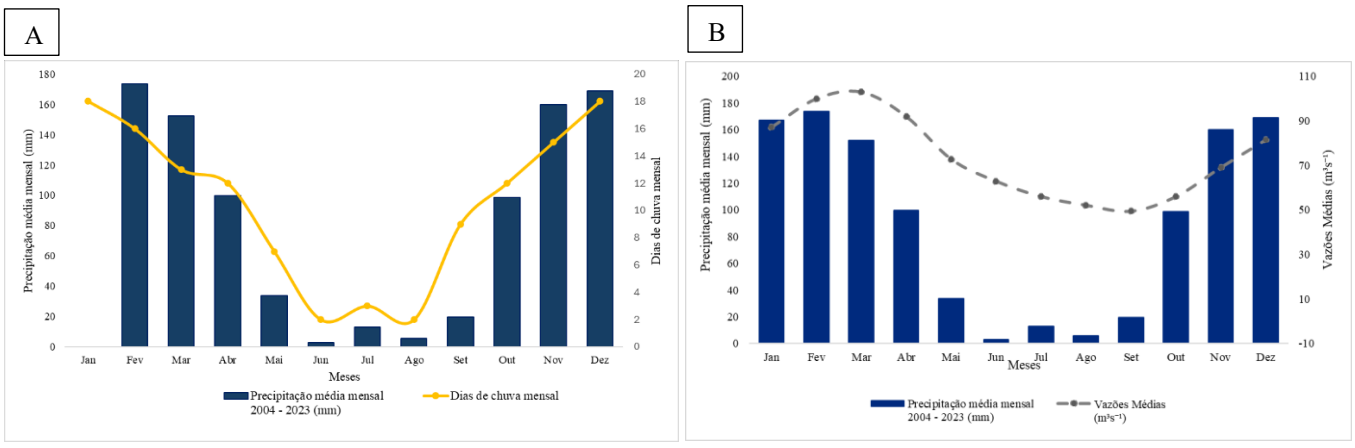


Figura 03: Estações 1.754.017 e 66.522.000 (Montante de 2004 a 2023). (A) Série histórica com a precipitação média mensal e dias chuvosos anuais; (B) Vazões médias dias mensais x Precipitação média mensal

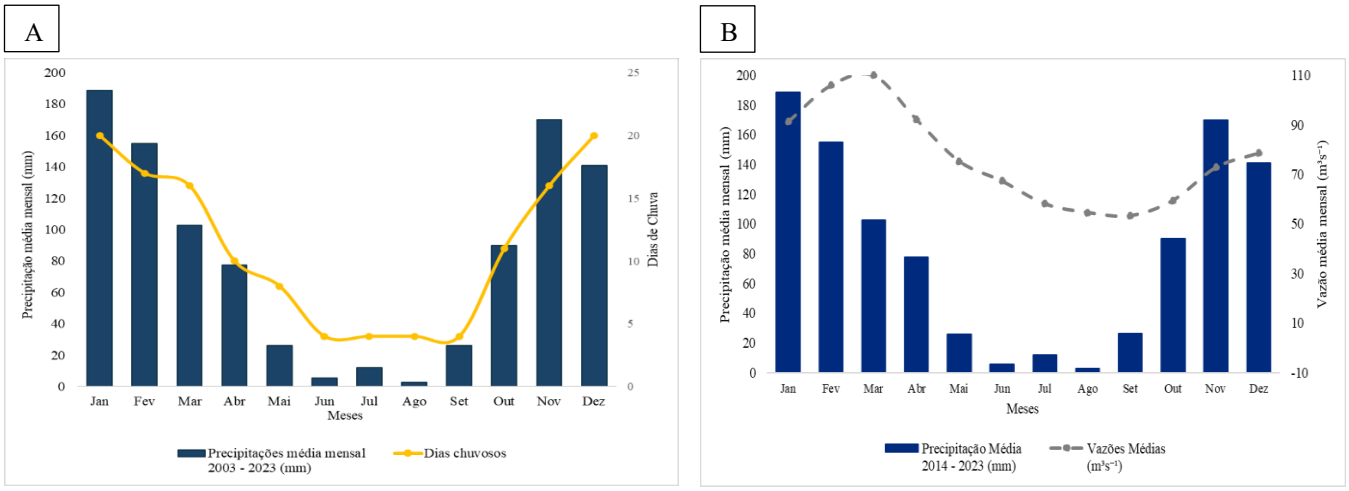


Figura 04: Estações 01.754.018 e 66.525.100 (Jusante de 2003 a 2023). (A) Série histórica com a precipitação média mensal e dias chuvosos anuais; (B) Vazões médias dias mensais x Precipitação média mensal

A comparação longitudinal de disponibilidade hídrica apresentada nas Tabelas 1, 2 e 3 apresenta a síntese estatística das vazões de permanência calculadas para as seções de montante e jusante da UHE Itiquira. A comparação dessas métricas é fundamental para compreender como a dinâmica de assoreamento e a operação a fio d'água influenciam a persistência dos fluxos mínimos que sustentam o ecossistema pantaneiro. A Tabela 1 ilustra o comparativo de vazões de permanência Q_{90} e Q_{95} e estatísticas descritivas para as estações de monitoramento (2004 – 2023).

Os resultados apresentados na Tabela 1 evidenciam a sensibilidade do regime de estiagem do rio Itiquira. Observa-se que as vazões Q_{90} e Q_{95} nas seções de jusante apresentam (redução/manutenção) em comparação aos valores de montante, o que reflete a interação entre a gestão operacional da UHE e a nova morfologia do leito. A proximidade entre os valores de Q_{95} e as vazões mínimas observadas no ano crítico de 2021 ratifica o estado de estresse hídrico do sistema durante eventos de seca extrema. Hidrológicamente, a manutenção desses patamares de permanência a jusante é vital para a preservação dos processos ecológicos no Pantanal. Contudo, o assoreamento progressivo, impulsionado por pulsos de sedimentos como os do ciclo 2010/2011, introduz uma incerteza não desprezível nas estimativas. A agradação do leito tende a elevar artificialmente o nível d'água para vazões menores, o que pode levar a uma superestimação da disponibilidade hídrica real se a curva-chave não for recalibrada periodicamente para compensar o efeito de *shifting control.* Essa divergência técnica reforça a importância da modelagem preditiva proposta neste estudo, que visa integrar o manejo de sedimentos *(sluicing)* à garantia da manutenção das vazões mínimas ambientais.

O contraste entre o incremento da vazão média (+3,7%) e a severa redução da Q95 (-15,6%) revela um paradoxo de disponibilidade. Hidrologicamente, isso indica que o sistema perdeu sua capacidade de regularização natural e amortecimento: o rio torna-se mais "torrencial", com picos de cheia ligeiramente maiores e secas significativamente mais severas, um reflexo direto da perda de calha útil por assoreamento (Tabela 1).

Tabela 01: Síntese estatística das vazões médias e de permanência (Q_{90} e Q_{95}) para as seções de montante e jusante no período 2004 - 2023.

Estação de Controle	Localização Relativa	Q_{media} (m^3/s)	Q_{90} (m^3/s)	Q_{95} (m^3/s)
66.522.000	Montante	64,97	47,62	44,37
66.525.100	Jusante	67,35	44,16	37,43
Diferença	Impacto longitudinal	3,7%	-7,3%	-15,6%

Fonte: Elaborado pelos autores com dados do HidroWeb/ANA, utilizando o *software* Excel (2026).

Tabela 02: Estatísticas hidrológicas e vazões de permanência para a seção 66.522.000 Montante (2004 – 2023).

Parâmetro	Vazão (m^3/s)	Desvio padrão (m^3/s)
Q_{50} (m3/s)	64,97	21,71
Q_{90} (m3/s)	47,62	23,67
Q_{95} (m3/s)	44,37	23,98

Fonte: Elaborado pelos autores com dados do HidroWeb/ANA, utilizando o *software* Excel (2026).

Tabela 03: Estatísticas hidrológicas e vazões de permanência para a seção 66.525.100, Jusante (2004 – 2023).

Parâmetro	Valor (m^3/s)	Desvio padrão (m^3/s)
Q_{50} (m^3/s)	67,35	39,12
Q_{90} (m^3/s)	44,16	34,00
Q_{95} (m^3/s)	37,43	34,12

Fonte: Elaborado pelos autores com dados do HidroWeb/ANA, utilizando o *software* Excel (2026).

Os resultados apresentados ilustraram um contraste hidrológico importante: enquanto a vazão média (Q_{50}) apresenta um incremento marginal de 3,7% a jusante, as vazões de permanência crítica sofrem reduções acentuadas, atingindo -15,6% na Q_{95} (Tabela 04). Este comportamento indica que a disponibilidade hídrica de estiagem é severamente impactada no trecho inferior. Mais relevante ainda é o comportamento da variabilidade, onde o desvio padrão cresce de 23,98 m^3/s a montante para 34,12 m^3/s a jusante, resultando em uma incerteza combinada ($\sigma\Delta$) de 41,70 m^3/s na faixa da Q_{95}. Estatisticamente, isso comprova que o regime a jusante tornou-se mais instável e volátil do que o de montante.

Hidrologicamente, o aumento da dispersão (desvio padrão) a jusante, associado à queda nas vazões mínimas, é um indicativo clássico de instabilidade morfológica do leito. O assoreamento consolidado no reservatório e o rearranjo sedimentar constante alteram a seção transversal, provocando o efeito de *shifting control*. Essa volatilidade dificulta a manutenção de um aporte hídrico estável para o Pantanal, especialmente em anos de seca extrema como 2021. Sob a ótica de uma usina a fio d'água, a incapacidade de regularização aliada ao leito assoreado resulta em um sistema que propaga a incerteza estatística para o ecossistema a jusante, reforçando a urgência de modelos preditivos para otimizar as operações de descarga de sedimentos *(sluicing)*.

Tabela 04: Síntese comparativa das vazões de permanência (A) e da variabilidade estatística ($\sigma\Delta$) (B) entre as seções de montante e jusante (2004 – 2023)

A

Parâmetro de Permanência	Símbolo	Montante (m^3/s)	Jusante (m^3/s)	Δ Diferença (m^3/s)
Vazão Mediana (50%)	Q_{50}	64,97	67,35	0,037
Vazão de Estiagem (90%)	Q_{90}	47,62	44,16	-0,073
Vazão de Estiagem (95%)	Q_{95}	44,37	37,43	-0,156

B

	Símbolo	Montante (m^3/s)	Jusante (m^3/s)	σΔ Diferença (m^3/s)
Desvio Padrão	Q50	21,71	39,12	44,74
Desvio Padrão	Q95	23,98	34,12	41,70

Fonte: Elaborado pelos autores com dados do HidroWeb/ANA, utilizando o *software* Excel (2026).

Considerações finais

O estudo da variabilidade hidrológica longitudinal na UHE Itiquira demonstrou que a dinâmica de sedimentos e o regime operacional exercem influência direta na disponibilidade hídrica de jusante. As principais conclusões são apresentadas a seguir:

Degradação da permanência hídrica: Observou-se que, apesar do incremento marginal na vazão média (+3,7%), as vazões de permanência crítica sofreram reduções significativas, com uma queda de 15,6% na Q_{95} a jusante. Esse dado revela que o assoreamento do reservatório e a agradação do leito comprometem a segurança hídrica durante os períodos de estiagem.

Aumento da volatilidade estatística: O incremento de 23,98 m^3/s a montante para 34,12 m^3/s jusante, resultando em uma incerteza combinada ($\sigma\Delta$) de 41,70 m^3/s na faixa da Q_{95}, indica que o regime hídrico tornou-se mais instável e menos previsível após a passagem pelo empreendimento. Essa volatilidade é uma evidência matemática do fenômeno de *shifting control*, onde as constantes alterações morfológicas do canal em resposta ao rearranjo sedimentar distorcem a relação cota-vazão.

Impacto de eventos extremos: Os registros de grandes secas, como em 2010/2011, foram identificados como os principais indutores de pulsos sedimentares, enquanto anos secos, como 2021, evidenciaram a perda de funcionalidade hidráulica do leito assoreado.

Necessidade de modelagem preditiva: A instabilidade observada nos dados de desvio padrão justifica a implementação de modelos de Inteligência Artificial (*Machine Learning*) para a previsão operacional. Tais ferramentas são essenciais para otimizar as manobras de descarga de sedimentos *(sluicing*) de forma a conciliar a geração de energia com a manutenção da integridade hidrossedimentológica a jusante. A escolha por modelos de *Machine Learning* (Redes Neurais Artificiais) justifica-se pela natureza não-linear e multivariada dos processos hidrossedimentológicos. Diferente das curvas-chave tradicionais (potenciais), modelos baseados em aprendizado de máquina podem incorporar variáveis exógenas e defasagens temporais, capturando o efeito de histerese e as mudanças morfológicas do leito em tempo real

Recalibração de Curvas-Chave: Recomenda-se a intensificação dos monitoramentos de campo para a atualização frequente das curvas-chave, visando mitigar os erros de medição induzidos pelo rearranjo constante do material sedimentar no leito.

Considerações para a gestão da preservação do Pantanal: A redução da Q_{95} a jusante impõe riscos ecológicos ao Pantanal, uma vez que a persistência de vazões mínimas é vital para a manutenção das lagoas marginais e da biodiversidade local.

Os resultados confirmam que a engenharia ambiental deve evoluir de uma gestão puramente hidráulica para uma gestão hidrossedimentológica integrada. A redução observada na Q_{95} a jusante atesta que a outorga de uso da água precisa considerar o assoreamento como um fator dinâmico que altera a disponibilidade hídrica real ao longo da vida útil do empreendimento

Ressalta-se que a divergência observada entre o comportamento das vazões médias e a redução na permanência mínima evidencia um desequilíbrio hídrico longitudinal provocado pelo aporte sedimentar. Este cenário de volatilidade estatística valida a necessidade de avaliações criteriosas e do desenvolvimento de ferramentas de inteligência artificial (*Machine Learning)* para prever comportamentos operacionais que mitiguem o estresse hídrico no Pantanal. Assim, os resultados aqui apresentados consolidam as curvas-chave como etapa fundamental na preparação de dados para estudos avançados e futuras aplicações de modelos preditivos voltados à otimização das manobras de manejo de sedimentos *(sluicing*).

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e à Universidade de São Paulo (USP) pelo apoio recebido durante toda a pesquisa.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas. Brasília, DF. 2026. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/hidroweb/. Acesso em: 19 fev. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEL). **Contrato de Concessão nº 213/1998-ANEEL**: Exploração do aproveitamento hidrelétrico de Itiquira. Brasília, DF, 1998.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). Resolução Autorizativa nº 12.621, de 6 de setembro de 2022: Altera a titularidade da concessão da UHE Itiquira para Elera Renováveis S.A. Brasília, DF: ANEEL, 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai (Pantanal) – PCBAP: metodologia do Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai. Brasília, DF: Embrapa Pantanal, 1997. Atualizado em 08 ago. 2017.

BRASIL. Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Bacia do rio Itiquira – UHE Itiquira. Setor de Indústrias e Abastecimento Sul - Área de Serviços Públicos – Lote A 71215-000 – Brasília – DF.

CÁSSIA RAMOS, R. Comportamento do ciclo hidrológico da Bacia do Alto Paraguai e suas relações com as inundações do bioma Pantanal no período de 2000 a 2016. Revista da ANPEGE 2020.

DI BALDASSARRE, G., MONTANARI, A. (2009). Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis**. Hydrological Processes**, 23(9), 1394 – 1406.

ELERA RENOVÁVEIS. Usina Hidrelétrica Itiquira. Relatório Técnico, 2024. Disponível em: https://elera.com/nossos-ativos/itiquira/. Acesso em: 10 fev. 2026.

ELERA RENOVÁVEIS S.A. Relatórios operacionais e dados hidrossedimentológicos da UHE Itiquira. Rio de Janeiro: Elera, 2026.

FANTIN-CRUZ, I.; OLIVEIRA, M. D.; CAMPOS, J. A.; CAMPOS, M. M.; RIBEIRO, L. S.; MINGOTI, R.; SOUZA, M. L.; PEDROLLO, O.; HAMILTON, S. K. Further development of small hydropower facilities will significantly reduce sediment transport to the Pantanal wetland of Brazil. **Frontiers in Environmental Science**, 8, 577748. 2020.

FOLEY, M. M.; BELLMORE, J. R.; O'CONNOR, J. E.; DUDA, J. J.; EAST, A. E.; GRANT, G. E., ... & WILCOX, A. C. Dam removal: Listening in. **Water Resources Research,** 53(7), 5229-5246, 2017

HIRSCH, R. M., SLACK, J. R., SMITH, R. A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. **Water Resources Research**, 27(5), 803 – 813, 1991.

KNIGHTON, D. Fluvial Forms and Processes. Routledge. 2014.

MAILHOT, A., TALBOT, G., BOLDUC, S., FORTIER, C. Assessment of uncertainties in stage–discharge rating curves: a large-scale application to Quebec hydrometric network. **Hydrology and Earth System Sciences**, 29, 3615 – 3634. 2025.

MALDONADO, L. H., GAMARO, P. E. M., SANTOS, J. M. Alteração de curva-chave devido a assoreamento: caso da estação de Flórida, MS. Anais/Relatório técnico, 2024.

RANTZ, S. E. Measurement and Computation of Streamflow. US Department of the Interior, Geological Survey (USGS), v. 2175, 1982.

REISENBÜCHLER, M., BUI, M. D., SKUBLICS, D., RUTSCHMANN, P. Sediment Management at Run-of-River Reservoirs Using Numerical Modelling. **Water**, 12(1), 249. 2020.

ROJAS, M., QUINTERO, F., & YOUNG, N. Analysis of stage–discharge relationship stability based on historical ratings. **Hydrology**, 7(2), 31. 2020.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2002.

MORFOMETRIA FLUVIAL E CONECTIVIDADE HIDRODINÂMICA NA REGIÃO ALUVIAL DO RIO DO PEIXE, OESTE PAULISTA

1 Joyce Silva Vieira de Aguiar, 2 Paulo Cesar Rocha
FCT Unesp, joyce.aguiar@unesp.br; FCT Unesp, paulo-cesar.rocha@unesp.br

Palavras-chave: Rio Meandrante; Geometria Hidráulica; Rio do Peixe.

Resumo

A conectividade é vital para o equilíbrio ecológico e para a gestão hídrica e é influenciada por fatores geomorfológicos e processos de meandramento. A morfometria fluvial, por meio do índice de sinuosidade, constitui uma importante ferramenta para avaliar o comportamento hidrológico. Este estudo analisa a variação da sinuosidade como indicador da conectividade hidrodinâmica em sistemas rio-planície de inundação no baixo curso do Rio do Peixe (SP). A pesquisa teve como objetivo avaliar as mudanças morfométricas do canal fluvial e compreender os fatores associados ao seu ajuste. O estudo considera três mecanismos principais de mudança nos meandros: crescimento, migração e corte de pedúnculo (cutoff). A análise foi realizada em três trechos ao longo do rio, com base em imagens de satélite, permitindo identificar mudanças morfológicas e oscilações na sinuosidade, bem como fatores internos e externos relacionados à dinâmica fluvial. Os resultados indicam variações na sinuosidade entre os trechos analisados, com tendência geral de diminuição ao longo do período estudado. Observou-se um padrão de ajustamento do canal, com redução da mobilidade fluvial em determinados trechos. As principais mudanças ocorreram devido aos processos de corte de pedúnculo e migração dos meandros, afetando a morfologia da planície. A comparação com dados históricos evidencia que essas mudanças se inserem em uma tendência de longo prazo de reorganização morfodinâmica do sistema. Fatores antrópicos, como a presença de reservatórios e alterações no regime hidrológico, especialmente a redução da vazão, são apontados como potenciais condicionantes dessas transformações. Na perspectiva desta pesquisa, baseada na avaliação espaço-temporal das mudanças do canal, considera-se que a análise da sinuosidade permite compreender a dinâmica fluvial em diferentes escalas, contribuindo para o entendimento das formas e processos que regulam sistemas meandrantes.

Introdução

A conectividade hidrológica em sistemas rio-planície de inundação desempenha um papel fundamental na dinâmica dos ecossistemas aquáticos e na sustentabilidade dos recursos hídricos. Compreender e caracterizar essa conectividade é essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão e conservação desses sistemas. Os estudos geomorfológicos fluviais vêm sendo levados a partir de uma visão holística, principalmente quando com enfoque ambiental. O comprometimento de qualidade e quantidade da água vem sendo posto em risco quando se despreza sua preservação (Rocha, 2011).

A morfometria fluvial surge como uma ferramenta promissora, permitindo a análise quantitativa das características geomorfológicas dos rios e planícies de inundação. Pode-se ter uma melhor noção do comportamento hidrológico, uma vez que, os parâmetros morfométricos são bons indicadores da capacidade de escoamento superficial (Nunes; Ribeiro; Fiori, 2006). A sinuosidade é uma medida morfométrica que indica o grau de curvatura ou tortuosidade de um curso de água, como um rio. A determinação dos padrões de canais fluviais (retilíneo, sinuoso, meandrado, trançado etc.), assim como a compreensão da dinâmica de modificação das margens dos rios pode ser obtida pelo índice de sinuosidade. Cientificamente esse índice está relacionado com características morfológicas, sedimentológicas e hidráulicas de um rio (Ratzlaff, 1991). Rios meandrantes podem comportar-se como sistemas geomórficos altamente dinâmicos. As mudanças do canal nesses rios, principalmente devido ao aumento da sinuosidade, produzem intenso retrabalho na planície e a herança de canais abandonados em diferentes estágios. Essas formas e respectivos processos registram a evolução geomorfológica, preservando as características dos fatores que controlam o modelado da paisagem fluvial (Brierley e Fryirs, 2005; Charlton, 2008).

A dinâmica dos meandros é controlada por diferentes mecanismos de mudança, dentre os quais se destacam o crescimento, a migração lateral e o corte de pedúnculo (cutoff). O crescimento dos meandros está associado à erosão nas margens externas e à deposição nas margens internas, resultando no aumento da sinuosidade. A migração decorre da ação hidrodinâmica do fluxo, promovendo a redistribuição de sedimentos ao longo da planície aluvial. Nesse processo, há erosão na margem côncava e deposição na margem convexa, configurando um ciclo contínuo de retrabalho sedimentar. Conforme descrito por Monteiro (2002), o comportamento do fluxo em meandros está mais relacionado à dinâmica horizontal do que à vertical, o que condiciona a reorganização dos materiais na planície. O corte de pedúnculo (cutoff) constitui um dos processos mais expressivos na evolução dos meandros, ocorrendo quando o canal estabelece um trajeto mais direto, abandonando parte de sua curvatura. Esse processo resulta na redução da sinuosidade e na formação de lagos em ferradura (oxbow lakes), importantes indicadores da dinâmica fluvial pretérita. Esses mecanismos têm sido amplamente discutidos na literatura, destacando-se os trabalhos de Hooke e Harvey (1983), Hooke (2007) e Stølum (1998), que relacionam a evolução dos meandros a variáveis como energia do fluxo e resistência das margens.

Nesse contexto, a análise das variações de sinuosidade em rios meandrantes constitui um importante caminho para a compreensão da conectividade hidrológica em sistemas rio-planície de inundação. Este estudo dá continuidade às investigações realizadas por Morais (2015) na planície fluvial do Rio do Peixe, considerando a influência de fatores internos e externos na dinâmica do canal (Phillips, 2003). Dessa forma, o objetivo deste estudo é analisar as variações espaço-temporais da sinuosidade no baixo curso do Rio do Peixe, a fim de compreender a dinâmica fluvial e sua relação com a conectividade hidrodinâmica.

Material e Métodos

Área de Estudo

O estudo foi realizado na região do baixo curso do Rio do Peixe, na região Oeste Paulista. A bacia hidrográfica do rio do Peixe abrange uma área de 10.769 km² e tem suas nascentes localizadas próximas aos municípios de Garça e Marília em uma altitude aproximada de 670 metros. Sua foz no rio Paraná, alcança um nível de base regional de 240 metros, entre os municípios de Presidente Epitácio e Panorama, totalizando aproximadamente 380 Km de extensão. No vale aluvial do baixo curso do rio do Peixe (Figura 01), forma-se uma extensa planície de inundação com diferentes níveis de terraços, onde o canal adquire uma sinuosidade acentuada (índice >1,5), evidenciando um padrão meandrante nos últimos 40 km do rio, desenhados em linha reta perpendicular ao canal até sua confluência com o rio Paraná.

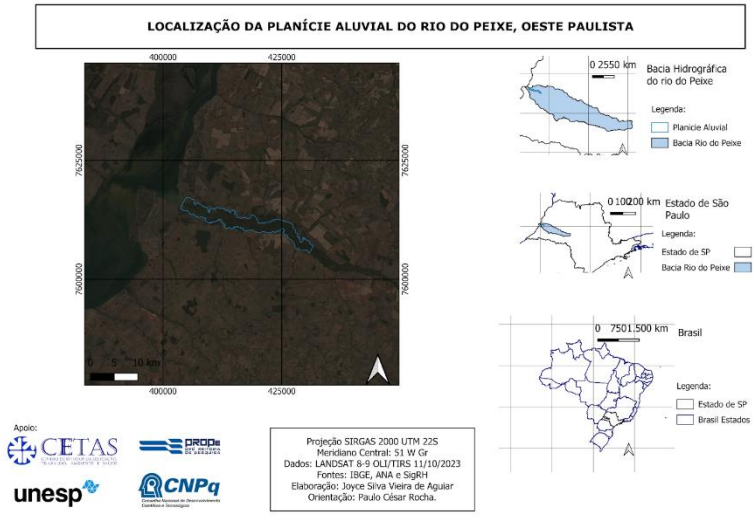


Figura 01: Vale aluvial do rio do Peixe.

A área específica de estudos está no seu compartimento inferior, conforme destacada na Figura 02.

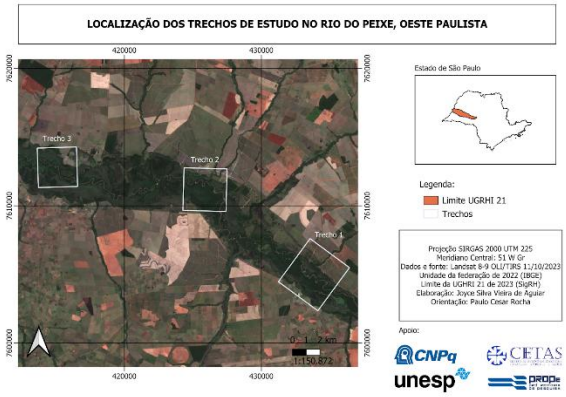


Figura 02: Localização dos trechos na área de estudo.

O canal do rio do Peixe percorre cerca de 70 km pelo vale aluvial, onde predomina a erosão dos sedimentos da planície de inundação. A vazão média mensal é diretamente influenciada pelo regime de precipitação regional, com maior fluxo concentrado entre dezembro e fevereiro, e o menor entre julho e setembro (Rocha & Tommaselli, 2012). O canal apresenta um padrão meandrante característico em seu baixo curso. Nessa região, o vale aluvial se destaca, com uma extensa planície de inundação (entre 400 e 3400 metros), cercada por terraços holocênicos, paleocanais e lagos de meandro, que indicam uma dinâmica fluvial intensa. A área de conservação do Parque Estadual do Rio do Peixe (São Paulo, 2002) está localizada no vale aluvial do baixo curso do rio, e constitui o maior recorte espacial deste estudo. Esta unidade de conservação, de proteção integral, abriga uma rica biodiversidade.

Metodologia

Para este estudo, foram selecionados três trechos do canal no baixo curso do Rio do Peixe, conforme delimitação proposta por Morais (2015), adotada neste estudo para fins de comparabilidade com análises anteriores. Para a análise das

mudanças morfológicas, foram utilizadas imagens de satélite dos sensores Landsat-8 e Landsat-9 (OLI/TIRS), com resolução espacial de 30 metros, referentes aos anos de 2013, 2018 e 2023. As datas foram selecionadas de modo a manter intervalos temporais regulares para comparação das alterações no canal.

As imagens foram processadas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software QGIS. As margens do canal foram vetorizadas manualmente, em escala fixa de 1:12.000, para cada trecho e período analisado, garantindo padronização na extração dos dados espaciais.

A sinuosidade foi calculada como a razão entre o comprimento do canal e o comprimento paralelo a ele, permitindo a comparação entre os diferentes períodos. A análise temporal foi realizada em intervalos de cinco anos, possibilitando a avaliação das variações morfométricas e da dinâmica fluvial nos trechos selecionados.

Resultados e Discussão

A partir do tratamento e análise de imagens, foi possível traçar as margens do rio para cada ano utilizando uma escala de 1:12000, como indicado na Figura 03.

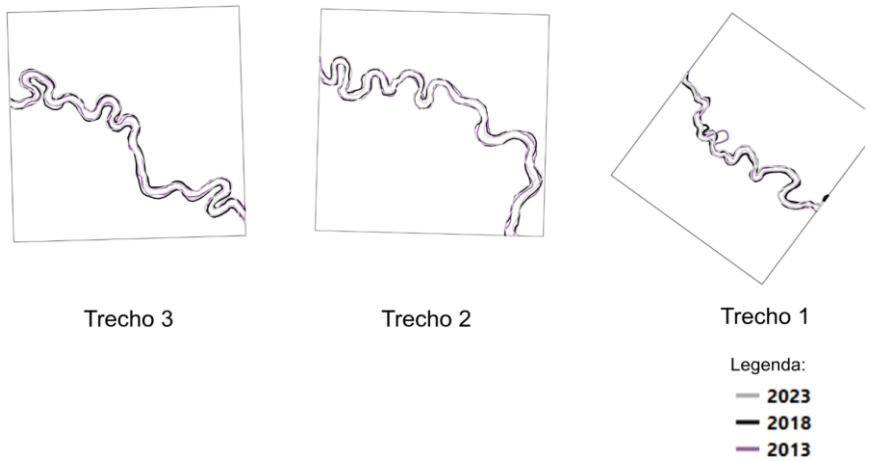


Figura 03: Trechos vetorizados para análise da sinuosidade. Fonte: Autores, 2024.

A partir da vetorização, foram obtidos os índices de sinuosidade para os três trechos analisados nos anos de 2013, 2018 e 2023 (Tabela 01).

Ano	Sinuosidade no trecho 1	Sinuosidade no trecho 2	Sinuosidade no trecho 3
2013	1,74997	1,92809	1,70503
2018	1,69132	1,97618	1,67429
2023	1,72388	1,83002	1,6549

Tabela 01: Índices de sinuosidade. Fonte: Autores, 2024.

Para uma análise mais detalhada, considera-se o trecho 1 (Figura 04). Nesse trecho, observou-se a ocorrência de um corte de pedúnculo no período de 2013 a 2018, seguido por processos de migração entre 2013 e 2023.

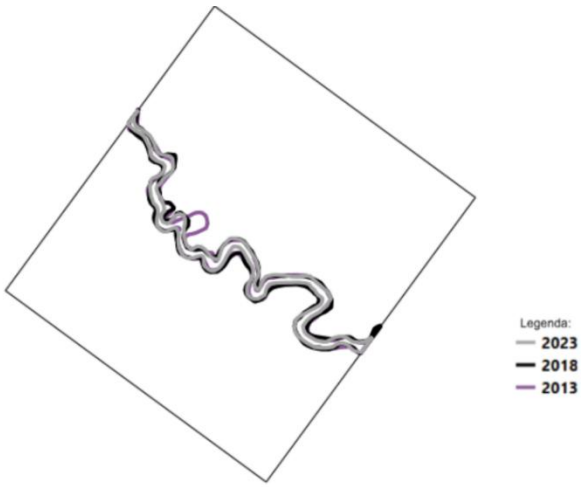


Figura 04: Margem do rio vetorizada no trecho 1. Fonte: Autores, 2024.

O corte de pedúnculo indicou ser o principal mecanismo associado às alterações morfológicas no trecho 1. Este ocorreu em um meandro composto, decorrente do desenvolvimento assimétrico do canal, e resultou na diminuição em 3,35% da sinuosidade no trecho no período 2013-2018 e, para o período de 2018-2023, a sinuosidade aumentou cerca de 1,93%. Os processos de migração contribuíram para a formação de meandros abandonados, que permanecem como registros das características geométricas e dos volumes de vazão fluvial no momento de seu abandono, ficando "marcados" nas planícies aluviais.

No trecho 2 (Figura 05), ocorreram as menores transformações morfológicas entre os setores analisados.

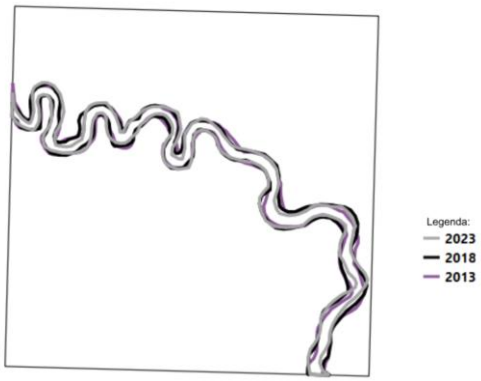


Figura 05: Margem do rio vetorizada no trecho 2. Fonte: Autores, 2024.

Observou-se a predominância de processos de migração, seguida por crescimento do canal. Nesse trecho, verificou-se aumento da sinuosidade entre 2013 e 2018, seguido de diminuição de 7,39% no período de 2018 a 2023.

No trecho 3 (Figura 06), as alterações foram menos expressivas em comparação aos demais trechos, com predominância de processos de crescimento do canal e, em menor intensidade, de migração de meandros. Nesse setor, o canal apresentou diminuição da sinuosidade de aproximadamente 2,94% ao longo do período analisado.

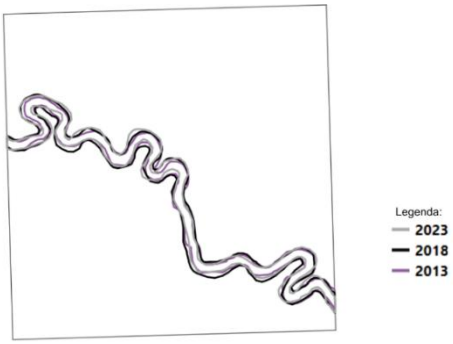


Figura 06: Margem do rio vetorizada no trecho 3. Fonte: Autores, 2024.

A respeito da oscilação da sinuosidade, podem ser elencados alguns aspectos morfológicos dos meandros assim como o papel de mecanismos de mudança no canal. As progressivas mudanças ocorridas em todos os trechos ao longo dos períodos em direção a índices sem grandes diferenças de sinuosidade sugerem o ajuste do canal às condições hidrodinâmicas atuais. Observou-se também um padrão de ajuste progressivo de jusante para montante, conforme indicado por Morais (2015).

No gráfico 01, os índices de sinuosidade são comparados com os analisados por Morais (2015) para os anos de 1962, 1978, 1997 e 2008.

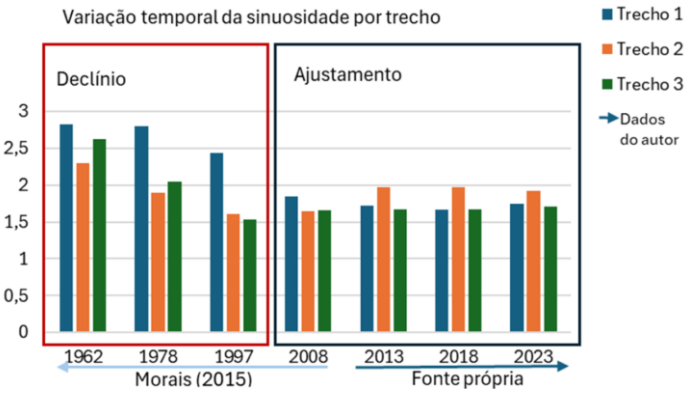


Gráfico 01: Variação da sinuosidade por trecho. Fonte: Autores, 2024.

Com os resultados obtidos a partir do gráfico, podemos identificar um declínio na sinuosidade dos trechos no período de 1962 a 1997, seguido de um ajustamento de canal de montante à jusante em períodos a partir de 2008.

Considerando a morfodinâmica dos trechos, verificou-se que a quantificação das áreas erodidas e sedimentadas foi essencial para interpretar a intensidade dos mecanismos de mudança dos meandros. Os parâmetros morfométricos dos trechos evidenciaram uma variação na forma do canal ao longo dos períodos analisados e baseando-se na escala de trechos e no intervalo de anos, indicou-se que houve diminuição na dinâmica fluvial para os períodos analisados até 1997.

As mudanças do canal nos trechos analisados a partir de 2008, indicaram o ajustamento fluvial confirmando o fenômeno inicialmente observado por Morais (2015), que em sua tese, questionou se esse fenômeno se confirmaria em análises subsequentes, considerando que o comportamento de rios meandrantes é complexamente expresso em sua dinâmica não linear.

As avulsões resultaram em transformações significativas na morfologia fluvial, e o reestabelecimento de meandros destaca esse mecanismo de mudança do canal como parte intrínseca da dinâmica meandrante. A presença de meandros compostos anteriores à ocupação da bacia hidrográfica, bem como o desenvolvimento desses meandros ao longo de décadas de intervenções antrópicas, indica que fatores intrínsecos regulam o padrão de ajustamento do canal, progredindo da jusante para a montante (Morais, 2015). Enquanto alguns trechos demonstram capacidade para formar meandros compostos e, consequentemente, sustentar maior sinuosidade, outros não apresentam a mesma capacidade. Nesses trechos, mecanismos de mudança, como cortes de pedúnculos e avulsões, são ativados, reduzindo a sinuosidade do canal. Entende-se, portanto, que as evidências, especialmente a presença de meandros compostos, indicam que o padrão dessas mudanças, segue fatores intrínsecos à dinâmica meandrante.

Identificar as causas do ajustamento fluvial é uma tarefa complexa, especialmente em ambientes sujeitos a impactos cumulativos (Rinaldi, 2003; Downs et al., 2013; Nelson et al., 2013), como na bacia hidrográfica do rio do Peixe. As mudanças no uso do solo e a presença do reservatório de Quatiara a montante representam fatores antrópicos com potencial influência na dinâmica fluvial dos trechos do rio do Peixe ao longo dos períodos estudados (Morais, 2015). Ambos os fatores parecem ter contribuído para os ajustamentos observados nesses trechos.

Os impactos antrópicos podem ser associados a alterações na morfologia fluvial, como a formação de formas fluviais decorrentes de períodos de intensas mudanças no uso do solo. Exemplos incluem a criação de extensos deltas (Maselli e Trincardi, 2013), o aumento da superfície de lagos em ferradura (Delhomme et al., 2013) e a formação de leques aluviais (Etchebehere, 2000; Brannstrom & Oliveira, 2000) que, nos trechos em estudo, foram identificadas 8 dessas unidades geomórficas, com tamanhos expressivos (0,4 a 42,7 ha) e dinâmica deposicional ativa (Morais, 2015). No vale aluvial, observa-se que alguns tributários responsáveis pela carga sedimentar dessas unidades apresentam cabeceiras sujeitas a processos erosivos, incluindo a formação de voçorocas. Assim, torna-se plausível associar a morfogênese dessas unidades às práticas de uso e manejo do solo agropecuário.

A montante dos trechos estudados e a 35 km do início do vale aluvial foi instalada a Pequena Central Hidrelétrica (PCH) de Quatiara, situada no médio curso do rio do Peixe, no município de Rancharia. As características operacionais do reservatório permitem a liberação periódica do estoque de sedimentos para a jusante, com a liberação da pluma de sedimentos pelo vertedouro há, no rio do Peixe, o recobrimento do leito rochoso do canal por dezenas de metros que induzem a formação instantânea de barras fluviais. Outro reservatório que impactou o rio do Peixe é a Usina Hidrelétrica de Porto Primavera que está situada no rio Paraná, localizada a jusante dos trechos estudados. Formado em 1998, o reservatório gerou um remanso na confluência, inundando 4 km a montante da foz do rio do Peixe, incluindo o Trecho 4 dos estudos de Morais (2015), que não puderam ser apresentados neste estudo devido a esse impacto. Portanto, os reservatórios para geração de energia hidrelétrica, localizados no alto curso do rio do Peixe e no rio Paraná, também são considerados fatores antrópicos com potencial de influência na dinâmica fluvial.

Os estudos analíticos dos meandramentos quase sempre relacionam o débito fluvial (vazão) com as demais propriedades geométricas (razão largura-profundidade, comprimento de onda, amplitude, raio de curvatura, etc.) (Cristofoletti; Oliveira; 1974, 1975). Assim, as características do regime hidrológico do rio do Peixe no vale aluvial foram analisadas com base em dados de vazão média mensal registrados entre 1962 e 2023 (Figura 07). Esses dados, fornecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA), são provenientes da estação fluviométrica de código 63710000.

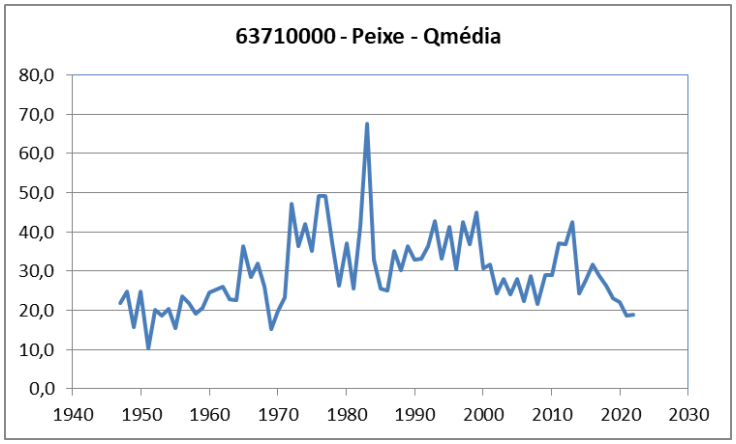


Figura 07: Vazão média anual na estação fluviométrica 63710000 (ANA) no rio do Peixe próximo do trecho aluvial do rio (ajustados para o período 1962-2023). Fonte: Adaptado de SP ÁGUAS (2024).

Os dados de vazão para os anos em que Morais (2015) avaliou a sinuosidade do rio do peixe (1962, 1978, 1997 e 2008) indicaram padrões irregulares que podem não ser associados à mudança da sinuosidade do canal. Já para os anos a partir de 2013, houve uma diminuição da vazão seguida de valores continuamente baixos para esse parâmetro.

Em um gráfico mais detalhado (Figura 08), podemos observar a vazão média anual para a estação fluviométrica 63710000 (ANA), entre os anos de 2008 e 2023.

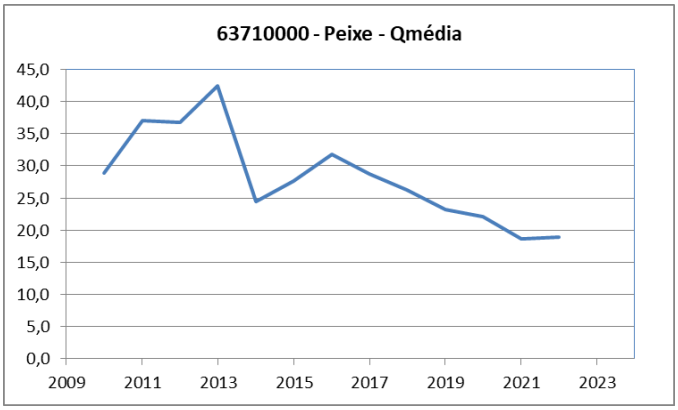


Figura 08: Vazão média anual na estação 63710000 (ANA), 2013-2023. Fonte: Adaptado de SP ÁGUAS (2024).

A análise dos dados de vazão em relação à sinuosidade do Rio do Peixe pode indicar uma relação entre a redução da vazão e a diminuição da sinuosidade a jusante do canal. Com a diminuição nos valores de vazão a partir de 2013 e sua estabilização a partir de 2015, a dinâmica fluvial do rio sofreu mudanças, refletidas na morfologia dos meandros. Antes de 2013, a alternância entre períodos de cheia e seca promovia o transbordamento do rio e a inundação das planícies, favorecendo processos geomorfológicos como a ressurgência do lençol freático e a mobilidade dos meandros.

A diminuição da vazão tende a reduzir a frequência e intensidade das inundações, o que diminui a capacidade de erosão e sedimentação lateral do rio, limitando o retrabalho da planície de inundação e favorecendo o ajustamento do canal. Dessa forma, as alterações no regime hidrológico podem atuar como um dos fatores condicionantes das mudanças morfométricas observadas. A estabilização da vazão após 2015 contribui para consolidar essa nova configuração fluvial, restringindo a dinâmica dos meandros e o potencial de formação de novas curvas. Assim, a pesquisa aponta que as mudanças no regime hidrológico, especialmente a redução e estabilização das vazões, desempenham um papel que pode influenciar ou não na modelagem da sinuosidade e no controle da morfologia fluvial do Rio do Peixe, influenciando diretamente os processos de formação e ajustamento da planície de inundação.

Algumas outras interações orientam a autorregulação do sistema de canais fluviais, onde as variáveis componentes ajustam suas relações e interações para organizar o fluxo de matéria e energia. São elas a relação de continuidade, em que a vazão ou descarga transporta a carga detrítica, o volume de água e a energia do escoamento fluvial desde o trecho de montante até o de jusante; a relação de geometria hidráulica, que envolve a interação entre a velocidade do fluxo, profundidade, declividade e rugosidade do canal; e, por último, a relação entre a competência do rio e o transporte da carga detrítica. Além dos ajustes internos, a autorregulação também acomoda alterações no fluxo resultantes da interconexão com outros sistemas.

Considerações finais

A pesquisa na área do baixo curso do rio do Peixe, utilizando dados de sinuosidade, possibilitou identificar a evolução das curvas meândricas, sendo possível observar alterações morfométricas nos sistemas fluviais e sua distribuição espacial em diferentes períodos hidrológicos. Verificou-se a atuação de mecanismos de mudança dos meandros como cortes de pedúnculos, crescimento e migrações que resultaram na diminuição da sinuosidade do canal, exercendo importante controle na formação da planície. Ademais, apesar da acentuada diminuição da sinuosidade seguido de um ajustamento, o comportamento de rios meandrantes deve ser avaliado considerando a complexidade expressa em sua dinâmica não linear. Fatores externos como a instalação de reservatórios e uso do solo foram apontadas como as principais atividades com potencial para impactar a dinâmica fluvial do rio do Peixe.

A interação integrada dos elementos geomorfológicos nas escalas espaço-temporal permite uma visão holística do funcionamento dos sistemas fluviais do rio do Peixe, considerando variações temporais e espaciais. Esses aspectos da geomorfologia, em um ambiente tropical, não só aprimoram a compreensão da dinâmica fluvial, mas também oferecem fundamentos importantes para outras áreas, como a ecologia em rios meandrantes (Latrubesse et al., 2005), além de contribuir para a previsão do comportamento fluvial em longo prazo e subsidiar estratégias de gestão e conservação da planície de inundação. Os resultados e as conclusões deste trabalho levantam novas questões e orientam direções para estudos futuros sobre a morfodinâmica fluvial do rio do Peixe. A análise dos perfis longitudinais dos afluentes pode contribuir para a compreensão da dinâmica morfoestrutural da bacia hidrográfica e de suas influências sobre o sistema fluvial. Tais estudos são relevantes para evidenciar o papel das políticas públicas relacionadas ao planejamento físico-territorial regional.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Universidade Estadual Paulista (UNESP), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); Ao Laboratório de Geologia, Geomorfologia e Recursos Hídricos da FCT Unesp (LabGeo); A Coordenadoria de Permanência Estudantil (COPE); Ao Centro de Estudos em Educação, Trabalho, Ambiente e Saúde (CEETAS); e a Pró Reitoria de Pesquisa (PROPe).

Referências Bibliográficas

Brannstrom, C.; Oliveira, A.M.S. Modificação humana dos vales fluviais no planalto oeste de São Paulo, Brasil: implicações para as narrativas e a gestão ambiental. São Paulo: **Degradação da Terra**, 2000.

Brierley, G.J.; Fryirs, K. **Geomorfologia e Gestão de Rios: Aplicações do Modelo de Estilos Fluviais**. Oxford, U.K: Blackwell, 2005, 412p.

Charlton, R. **Fundamentos da Geomorfologia Fluvial**. New York: Routledge, 2008, 275p.

Christofoletti, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1974. 149 p.

Christofoletti, A.; Oliveira, A. A. B. Análise morfométrica dos meandramentos do Vale do Paraíba, na área da Bacia Sedimentar de Taubaté. Campinas: **Notícia Geomorfológica**, v. 14, n. 27/28, p. 45-60, 1974.

Christofoletti, A.; Oliveira, A. A. B. Densidade de meandramentos. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 15, n. 29, p. 83-87, 1975.

Delhomme, C.; Alsharif, K. A.; Capece, J. C. Evolução da morfologia em forma de ferradura do rio Caloosahatchee no sul da Flórida. Flórida: **Applied Geography**, v. 39, p. 104–117, maio, 2013.

Downs, P. W.; Dusterhoff, S. R.; Sears, W. A. Geomorphology Reach-scale channel sensitivity to multiple human activities and natural events: Lower Santa Clara River, California, USA. **Geomorphology**, v. 189, p. 121–134, 2013.

Etchebehere, M.L.C. **Terraços neoquaternários no vale do Rio do Peixe, Planalto Ocidental Paulista**: implicações estratigráficas e tectônicas. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2000.

Hooke, J. M. **Complexity, self-organization and variation in behavior in meandering rivers.** San Diego, CA. Fluvial Geomorfology. v. 91, p. 236–258, 2007.

Hooke, J. M. Harvey, A. M. Meander changes in relation to bend morphology and secondary flows. **Collinson, J., Lewin, J. (Org.), Modern and Ancient Fluvial Systems.** International Association of Sediment Special Publication. Oxford, p. 121–132, 1983.

Latrubesse, E.; Stevaux, J.; Sinha, R. Tropical rivers. **Geomorphology,** v. 70, n. 3-4, p. 187–206, 1 set. 2005.

Maselli, V.; Trincardi, F. Man made deltas**. Scientific Report**, p. 1–7, 2013.

Monteiro, M. Y. **O sacado: morfo-dinâmica fluvial.** Cadernos da Amazônia. Manaus: INPA, 2002.

Morais, E. S. de. **Formas, processos e evolução no padrão de canal meandrante em diferentes escalas geomorfológicas:** o rio do Peixe, SP. 2015. Tese (doutorado) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2015.

Nelson, N. C.; Erwin, S. O.; SchmidT, J. C. Geomorphology Spatial and temporal patterns in channel change on the Snake River downstream from Jackson Lake dam, Wyoming. **Geomorphology,** v. 200, p. 132–142, 2013.

Nunes, F. G., Ribeiro, N. C., Fiori, A. P. **Propriedades Morfométricas e Aspectos Físicos da Bacia Hidrográfica do Rio Atuba:** Curitiba-Paraná. In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia. Goiânia, 6 a 10 de setembro de 2006.

Phillips, J. D. J. D. Toledo bend reservoir and geomorphic response in the lower Sabine River. **River Research and Applications, v. 159, p. 137–159, 2003.**

Ratzlaff, J. **Sinuosity components of the upper saline River Valley, Western Kansas.** Trans of the Kansas Academy of Sci., v.94, n.1-2, p. 46–57, 1991.

Rinaldi, M. **Recent channel adjustments in alluvial rivers of Tuscany, central Italy**. Earth Surface Processes and Landforms, v. 28, n. 6, p. 587–608, jun. 2003.

Rocha, P. C. **Sistemas rio-planície de inundação: geomorfologia e conectividade hidrodinâmica**. Em Pauta: Caderno Prudentino de Geografia, Presidente Prudente, v. 1, n. 33, p. 50-67, 2011.

Rocha, P. C.; Tommaselli, J. T. G. **Variabilidade hidrológica nas bacias dos rios Aguapeí e Peixe, Região Oeste Paulista.** Revista Brasileira de Climatologia, v. 10, p. 2237, 2012.

SÃO PAULO. Decreto nº 47.095, de 18 de setembro de 2002. Cria o Parque Estadual do Rio do Peixe. Disponível em: http://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Decretos/2002/dec_sp_47095_2002_uc_parqueestadualriopeixe_sp.pdf. Acesso em: 10 ago. 2024.

SP ÁGUAS. Sistema de Informações Hidrológicas do Estado de São Paulo. Hidrologia – Fluviométricos: UGRHI - Peixe. Sistema de Informações Hidrológicas, 2024. Disponível em: https://hidrologia.spaguas.sp.gov.br/?dadosorigem=Fluviom%C3%A9tricos&ugrhi=UGRHI&cidadeugrhi=PEIXE&prefixoposto=7D-010. Acesso em: 1 set. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH): Hidroweb. Acompanhamento hidrotelemetria. Brasília, 2024. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/acompanhamentoPcd.aspx. Acesso em: 1 set. 2024.

Stølum, H. H. **Planform geometry and dynamics of meandering rivers**. Geology, n. 11, p. 1485–1498, 1998.

RELIABILITY ASSESSMENT OF BATHYMETRIC SURVEYS FOR RESERVOIR USEFUL-LIFE ANALYSES

1 Leonardo de Souza Lisboa, 2 Rodolfo Rosendo de carvalho, 3 Joaquim Monteiro Garcez Duarte
1 G5 Engenharia, e-mail:lsl@g5engenharia.com.br; 2 G5 Engenharia, e-mail: rrc@g5engenharia.com.br;
3 G5 Engenharia, e-mail: jd@g5engenharia.com.br

Keywords: Reservoir sedimentation; Bathymetric survey; Reservoir useful life.

Abstract

Sedimentation is one of the main degradation processes affecting reservoirs, as it reduces storage capacity and may impair the operation of water supply, irrigation, and hydropower systems. Although bathymetric surveys performed at different times could, in principle, provide an observed basis for direct sedimentation assessment, their use is subject to methodological inconsistencies that may compromise the reliability of the comparison. This study evaluated the reliability of comparing bathymetric surveys from two reservoirs in southern Brazil using datasets acquired in different periods. Elevation-area-capacity curves were analyzed, spatial compatibility between surveys was assessed, and percentage variations in area and volume were calculated at selected reference elevations. As a complementary approach, the elasticity between relative area and volume variations was used to assess geometric consistency between surveys. The results showed substantial differences between surveys, with simultaneous increases in surveyed area and storage volume in the most recent campaigns, a pattern inconsistent with the expected effects of sedimentation. The normalized elevation-volume curves indicated that the largest discrepancies are concentrated at lower elevations, corresponding to the deepest portions of the reservoirs, where the more recent surveys captured smaller storage volumes more consistently. Spatial clipping reduced part of the discrepancy, but significant volumetric differences remained. The elasticity analysis indicated local geometric consistency in the original data, whereas, after spatial matching, elasticity values became extremely high or unstable, indicating loss of physical meaning and reinforcing the inconsistency between surveys. It is concluded that direct comparison between bathymetric surveys may not be sufficient for reliable sedimentation assessment, especially when survey methodologies are not standardized between campaigns. In this context, evaluating geometric consistency through the area-volume relationship proved useful for identifying inconsistencies and for supporting a more critical use of topobathymetric data in reservoir useful-life analyses.

Introduction

Reservoirs used for water supply, irrigation, and hydropower generation depend directly on maintaining their storage capacity over time. In this context, sedimentation is one of the main degradation processes affecting these systems, as it reduces stored volume, compromises the useful storage available for operation, and may affect associated hydraulic and electromechanical structures. As highlighted by Rodriguez *et al*. (2023), reservoir sedimentation is a globally recognized phenomenon with direct implications for water security and the sustainability of water infrastructure systems.

Therefore, estimating storage loss and, consequently, reservoir useful life is essential for operational planning, maintenance strategies, and cost forecasting. However, such estimates are inherently uncertain, since sedimentation depends on multiple hydrosedimentological and environmental factors, including flow regime, sediment yield and transport within the watershed, land use and land cover, and reservoir geometry, all of which may vary over time (Perera *et al*., 2022).

In the absence of consistent sediment monitoring data, indirect or empirical approaches are often used to estimate sediment inflow and reservoir sedimentation. Among these, the simplified method proposed by Colby is widely applied because of its suitability for data-scarce conditions (Colby, 1957). However, these approaches often rely on sediment data from gauging stations located outside the area of interest, requiring regionalization procedures that introduce additional uncertainty into analyses that are already inherently approximate (Braga *et al*., 2021).

In principle, bathymetric surveys carried out at different times could provide an observed basis for direct sedimentation assessment through the comparison of elevation–area–capacity curves and reservoir surfaces. However, the technical literature indicates that such comparisons are not straightforward. Reports from the United States Bureau of Reclamation document cases in which more recent surveys yielded higher apparent storage capacities than earlier ones, owing to differences in survey methods, improved data resolution, and uncertainties associated with historical datasets. In the case of El Vado Reservoir, for example, the estimated capacity in a more recent survey exceeded previous estimates, primarily because of improvements in data quality rather than actual physical changes in the reservoir.

In addition, factors such as differences in vertical datum, survey spatial coverage, reservoir boundary definition, interpolation methods, and surface processing techniques can significantly affect the results. According to Wilson and Richards (2006), the development of area–capacity curves depends directly on data quality and processing procedures and may yield substantial differences even in the absence of physical changes. Likewise, international standards such as IHO S-44 emphasize that the reliability of bathymetric surveys is closely related to accuracy, sampling density, and spatial coverage, which are not always consistent across surveys performed in different years.

Against this background, it is necessary to question the reliability of using bathymetric surveys as a basis for sedimentation assessment in reservoirs. Thus, the guiding question of this study is: can available bathymetric surveys provide a reliable basis for estimating reservoir sedimentation when compared across different periods?

In this regard, the objective of this study is to evaluate the reliability of comparing bathymetric surveys from small hydropower reservoirs for sedimentation assessment, using the area–volume relationship along the elevation–area–capacity curve as a tool to analyze consistency between surveys.

Methodology

The study was conducted based on two reservoirs located in southern Brazil, hereafter referred to as Reservoir 1 and Reservoir 2, both situated in the state of Santa Catarina, within the Chapecó River sub-basin of the Uruguay River basin. The hydrographic basin associated with these reservoirs is shown in Figure 1.

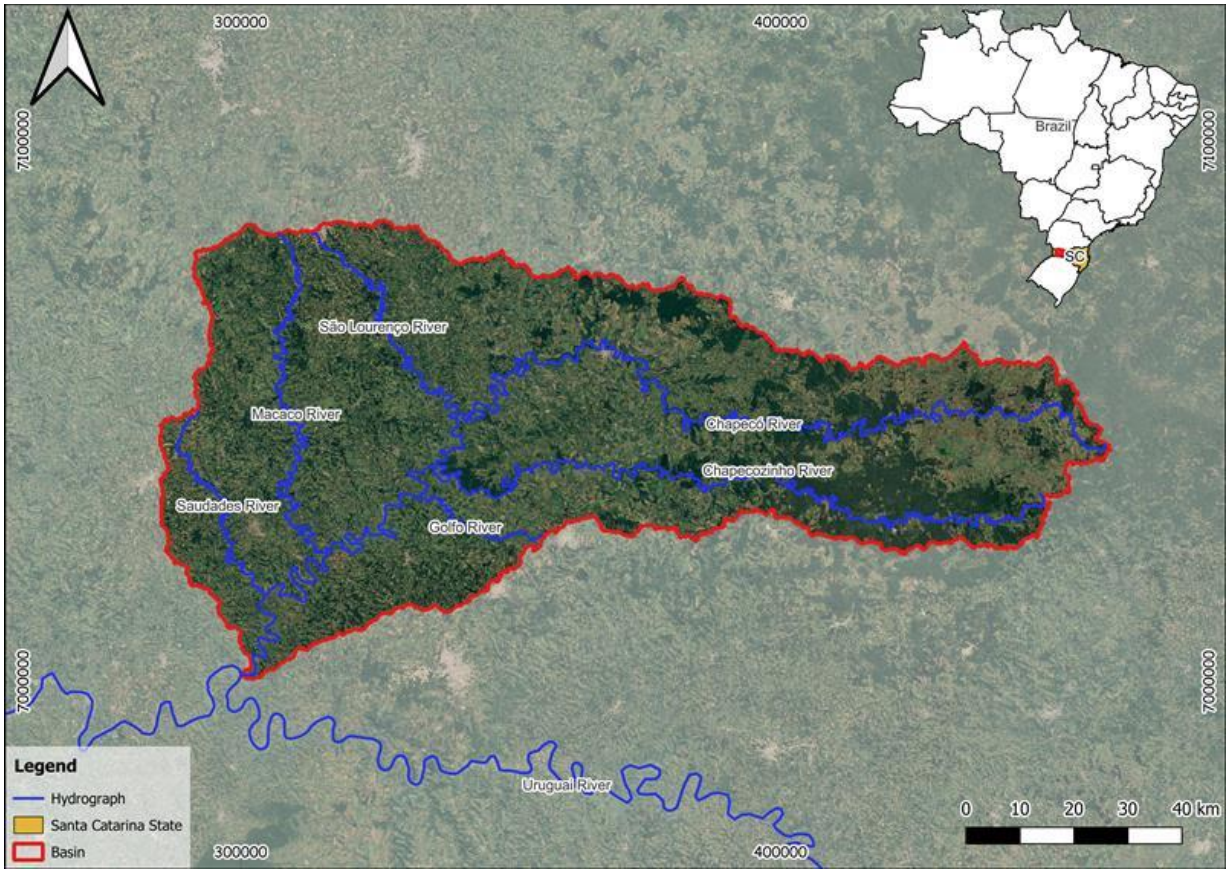


Figure 1: Location of the Chapecó River sub-basin within the Uruguay River basin, southern Brazil.

The general characterization of the reservoirs was based on geometric and hydrological information obtained from technical reports and available bathymetric surveys, as summarized in Table 1.

Parameter	Reservoir 1	Reservoir 2
Drainage area (km²)	890	1.149
Reservoir area in the initial survey (km²)	2,5	3,2
Initial total storage (m³)	13.824.000	20.429.190
Initial useful storage (m³)	1.517.000	4.360.000
Year of the first survey	2014	2006
Year of the second survey	2025	2025
Time interval between surveys (years)	12	20
Minimum operating level (m)	1011	683
Normal operating level (m)	1012	685

Table 1: Physical and geometric characteristics of the analyzed reservoirs.

Bathymetric surveys from two different periods were used for each reservoir, corresponding to 2014 and 2025 for Reservoir 1, and 2006 and 2025 for Reservoir 2. The most recent datasets were available as georeferenced raster files (.tif),

whereas the historical surveys were obtained from technical reports containing elevation–area–capacity curves and cartographic representations of the surveyed area.

To enable direct comparison between surveys and between reservoirs, normalized elevation–volume curves were developed. Normalization was applied to remove scale effects and preserve only the geometric shape of the relationship between water level and stored volume.

Volumes were normalized with respect to the maximum storage capacity of each reservoir, as defined in Equation (1). Similarly, elevations were normalized based on the operational range of each reservoir, as defined in Equation (2).

$$V^* = \frac{V}{V_{máx}} \quad (01)$$

$$H^* = \frac{H - H_{mín}}{H_{máx} - H_{mín}} \quad (02)$$

where $V^*$and H^*represent the normalized volume and elevation, respectively; $V_{max}$is the maximum storage volume; and $H_{min}$and H_{max}correspond to the minimum and maximum elevations considered.

This procedure allowed direct comparison of elevation–volume curves across different surveys and reservoirs, focusing on the assessment of geometric consistency independently of absolute scale differences.

Subsequently, it was observed that the more recent surveys exhibited significantly larger surveyed areas than the earlier ones, resulting in apparent increases in storage volume that are inconsistent with the expected behavior of sedimentation processes.

To ensure comparability between surveys, spatial compatibility was established using QGIS software. The area corresponding to the initial survey was digitized from available cartographic material and used as a spatial mask to clip the raster dataset of the most recent survey, restricting the analysis to the common spatial domain between surveys.

After spatial matching, area and volume values were extracted at selected operational elevations, including the minimum operating level and the normal pool level. These values were compared between surveys to evaluate geometric and volumetric consistency, following approaches described by Wilson and Richards (2006) and the United States Bureau of Reclamation (2008).

Percentage variations in area and volume between surveys were calculated at the normal pool level of each reservoir, allowing identification of trends inconsistent with the expected physical behavior of sedimentation. As a complementary tool for consistency assessment, an elasticity-based approach was adopted to analyze the relationship between relative variations in area and volume along the elevation–area–capacity curve. This analysis allowed evaluation of the sensitivity of volume to changes in area and was used as an indicator of geometric consistency between the compared surveys.

The elasticity $E$was defined according to Equation (3).

$$E = \frac{\ln(V_2/V_1)}{\ln(A_2/A_1)} \quad (03)$$

where $V_1$and V_2represent the volumes associated with the same elevation in the initial and final surveys, respectively, and $A_1$and A_2correspond to the inundated areas under the same conditions.

This relationship was calculated for elevations where area data from the initial survey were available, corresponding to two elevations for each reservoir, in order to evaluate the volumetric response to observed area variations. For interpretation purposes, elasticity values were qualitatively assessed based on their magnitude. Values close to unity indicate proportional variation between area and volume, reflecting geometric consistency. Values greater than one indicate greater volumetric sensitivity, associated with geometries influenced by depth variations. Values lower than one indicate predominance of lateral expansion, typical of shallower regions. Extreme or unstable values were interpreted as indicators of inconsistencies between surveys, reflecting loss of physical meaning in the area–volume relationship.

Results and Discussion

The normalized elevation–volume curves for both reservoirs, considering the initial and most recent surveys, are presented in Figure 2. The analysis of these curves reveals differences in both position and slope along the profile, indicating that the relationship between water level and stored volume is not consistent between surveys.

The largest discrepancies are observed at lower elevations, corresponding to the deepest portions of the reservoirs. In these zones, the more recent surveys present lower minimum elevations compared to earlier surveys, indicating an improved representation of small storage volumes. This result demonstrates that part of the observed volumetric differences arises from increased bathymetric detail in the recent surveys rather than from actual physical changes in the reservoirs.

Earlier surveys tend to underestimate volume in deeper regions due to lower sampling density and limitations in interpolation methods. As a result, the discrepancies observed in the elevation–volume curves primarily reflect methodological differences in the representation of the submerged topography, particularly at lower elevations where volumetric sensitivity is highest.

Furthermore, for the same elevation range, the estimated volumes differ between surveys without exhibiting a consistent geometric pattern. This reinforces that the observed variations cannot be directly attributed to physical processes such as sedimentation. Instead, they indicate inconsistencies in the representation of reservoir geometry, mainly associated with bathymetry rather than with the delineation of the inundated area.

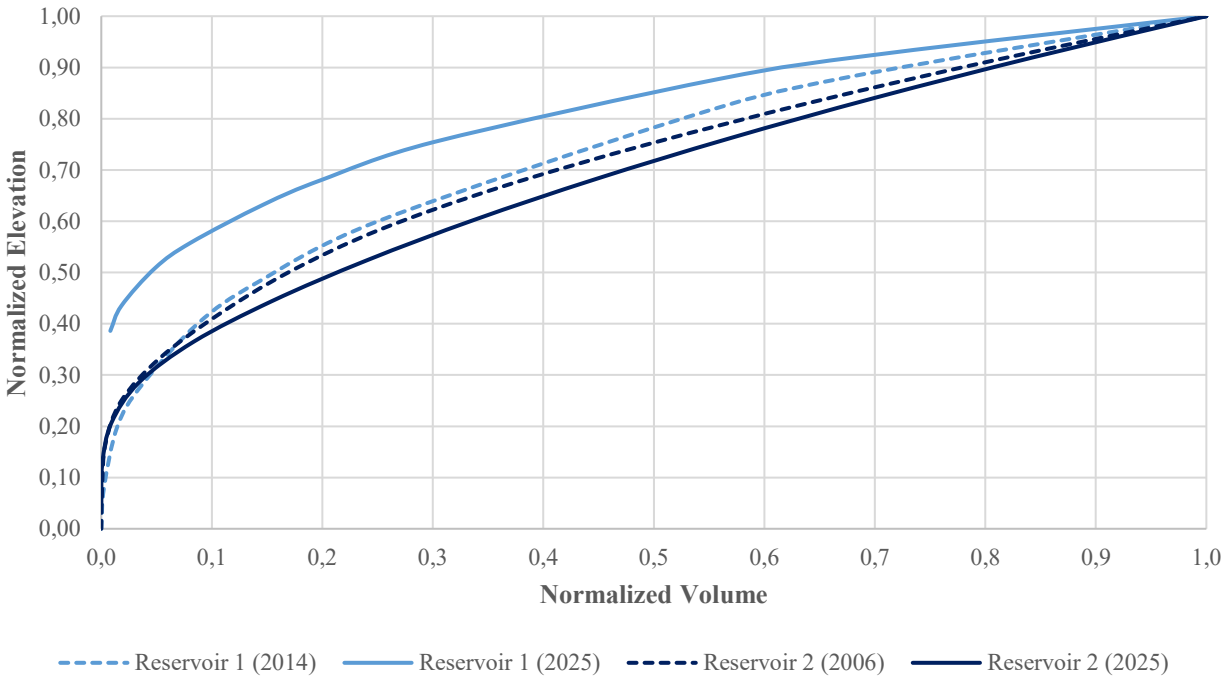


Figure 2: Normalized elevation–volume curves of the reservoirs (initial and final surveys).

This interpretation is supported by the direct comparison between bathymetric surveys, which showed substantial differences in surveyed area between datasets, with larger extents observed in the more recent surveys for both reservoirs. These differences were directly reflected in the elevation–area–capacity curves, resulting in higher total and useful storage volumes in the recent surveys—behavior that is inconsistent with the expected effects of sedimentation.

These findings demonstrate the presence of inconsistencies between surveys, preventing the direct use of elevation–area–capacity curves for reliable estimation of storage loss in the analyzed reservoirs.

To minimize the effect of differences in spatial coverage between surveys, spatial compatibility was established by clipping the most recent dataset using the boundary of the initial survey, restricting the analysis to the common domain between surveys. The results of this procedure are presented in Table 2.

Reservoir	Survery Condition	Area (m²)	Area variation (%)	Total storage (m³)	Volume variation (%)	Useful storage (m³)	Useful storage variation (%)
1	Initial suvery	1.746.684	–	13.824.000	–	1.517.000	–
	Final survery (original)	2.185.800	25,14%	18.970.000	37,23%	2.090.000	37,77%
	Final survery (clipped)	1.741.320	-0,31%	18.628.070	34,75%	1.732.309	14,19%
2	Initial suvery	2.260.234	–	20.429.198	–	4.360.000	–
	Final survery (original)	3.169.300	40,22%	30.700.000	50,28%	6.120.000	40,37%
	Final survery (clipped)	2.913.839	28,92%	29.811.238	45,92%	5.697.692	30,68%

Table 02: Comparison of area and volume values before and after spatial matching at the normal pool level.

For Reservoir 1, spatial matching reduced the area difference to negligible values (0.31%) and significantly decreased the discrepancy in useful storage. However, total storage remained substantially higher than in the initial survey, indicating that the discrepancy is not solely related to differences in the area surveyed.

For Reservoir 2, although spatial matching reduced part of the area discrepancy, significant differences remained in both total and useful storage. This indicates that the inconsistency between surveys cannot be attributed exclusively to spatial extent. The persistence of these differences suggests either greater sensitivity to geometric representation or higher methodological inconsistency between surveys.

In both reservoirs, a consistent pattern is observed: spatial matching reduces discrepancies but does not eliminate volumetric differences, particularly in total storage. This confirms that the main source of divergence is associated with the representation of bathymetry, especially at lower elevations.

In these regions, small variations in the interpolated surface result in significant volumetric differences due to the high geometric sensitivity of the reservoir bottom. Consequently, total storage is more susceptible to inconsistencies between surveys, whereas useful storage, associated with higher elevations, tends to be more stable.

Overall, the results demonstrate that direct comparison between bathymetric surveys, even after spatial matching, is not sufficient to represent sedimentation processes, as methodological factors may exert a dominant influence on the results.

As a complementary approach, elasticity between relative variations in area and volume was analyzed at reference elevations where comparable data were available. The results are presented in Table 3.

Reservoir	Reference elevation (m)	Area variation (%)	Total storage variation (%)	Useful storage variation (%)	Area–volume elasticity (total storage)	Area–volume elasticity (useful storage)
Reservoir 1	1012	25,1%	37,2%	37,8%	1,42	1,45
	1015	34,7%	16,3%	–	0,90	–
Reservoir 2	685	40,22%	50,28%	40,37%	1,20	1,22

Table 3: Elasticity of relative variations in area and volume.

The calculated values indicate that the original datasets generally exhibit coherent behavior between area and volume at the analyzed elevations, although differences in volumetric sensitivity are observed between reservoirs and elevation ranges. For Reservoir 1, a predominance of volumetric response is observed at the intermediate elevation, while a different behavior appears at higher elevation, associated with shallower regions. For Reservoir 2, the values indicate near-proportional behavior, suggesting local geometric consistency between surveys.

The distribution of these values across elevations and their relationship with geometric regimes are shown in Figure 3.

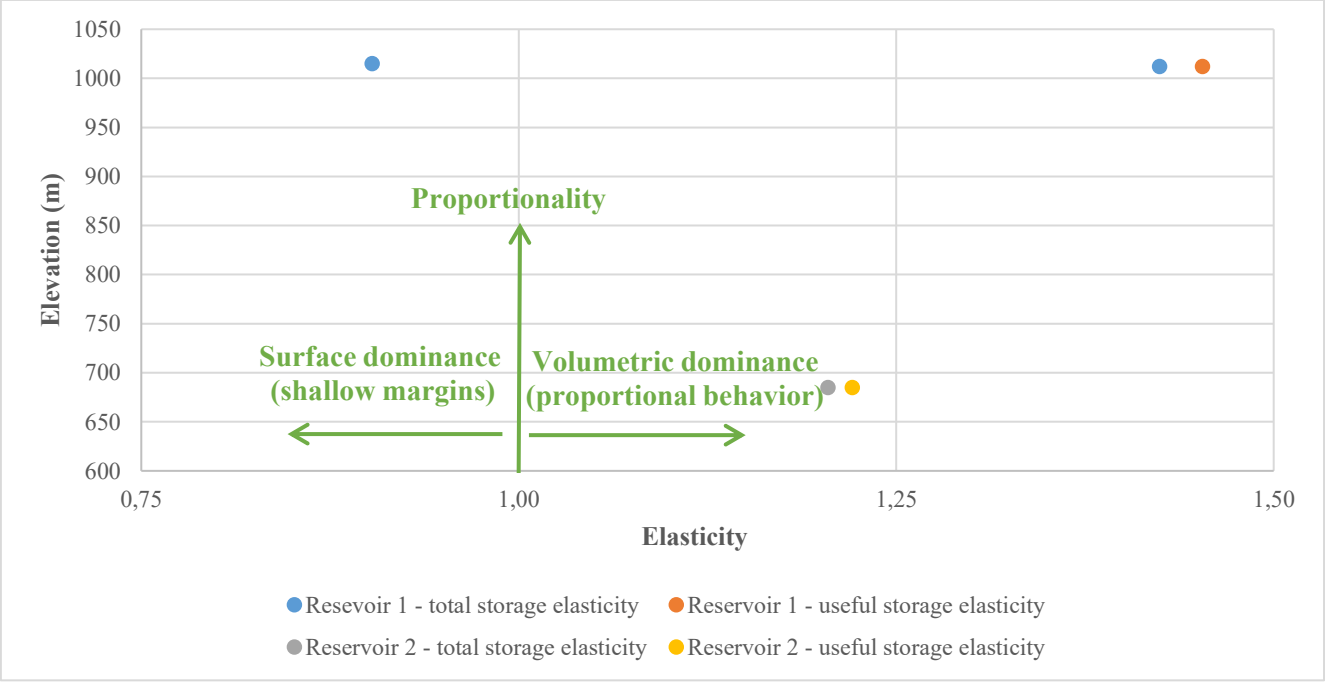


Figure 3: Relationship between area–volume elasticity and reference elevation, with indication of dominant geometric regimes.

The graphical representation highlights the organization of results into interpretative ranges, allowing clearer visualization of differences between reservoirs. Although the original data shows localized geometric consistency, this consistency is not maintained when integrated with the spatially matched datasets.

When applied to the clipped datasets, the elasticity analysis yields extremely high or unstable values due to the near equalization of areas combined with persistent volumetric differences. Under these conditions, elasticity loses its physical meaning, indicating that the discrepancies are not related to surface geometry but rather to the representation of bathymetry.

Therefore, the combined analysis confirms that, although local indications of geometric consistency may exist, the overall consistency of the surveys is not guaranteed. This reinforces the dominant influence of methodological factors and highlights the need for critical evaluation of bathymetric data before their use in sedimentation studies.

Conclusions

The results demonstrate that direct comparison between bathymetric surveys may not be sufficient for reliable sedimentation assessment in reservoirs, particularly in the absence of methodological standardization between surveys.

The analysis of the elevation–volume curves revealed systematic differences between surveys, with more pronounced discrepancies at lower elevations, associated with bathymetric representation. In these regions, the more recent surveys provided greater detail, indicating that part of the observed volumetric differences results from improvements in data resolution and survey methods rather than from actual physical changes in the reservoir.

Spatial matching proved effective in reducing differences associated with the delineation of the surveyed area; however, it was not sufficient to eliminate volumetric discrepancies. This indicates that the primary source of inconsistency is related to the representation of the submerged topography.

The area–volume elasticity analysis proved to be a useful tool for assessing geometric consistency between surveys, allowing the identification of situations in which the relationship between area and volume loses physical meaning. Unstable elasticity values observed after spatial matching indicate inconsistencies associated with bathymetric representation.

Overall, the findings indicate that sedimentation estimates based solely on the comparison of bathymetric surveys may be subject to significant uncertainties, as they are strongly influenced by methodological factors. In this context, the adoption of additional consistency checks and data validation criteria is essential, as well as the integration of complementary analytical approaches to improve the reliability of reservoir sedimentation assessments.

Additionally, the differences observed between values processed in a GIS environment and those reported in the original surveys highlight the sensitivity of results to interpolation and computational procedures. Even after spatial matching, the persistence of volumetric discrepancies confirms that differences between surveys are not solely related to the delineation of the analyzed area, but primarily to the representation of bathymetry.

Acknowledgements

The authors acknowledge G5 Engenharia, an engineering company, for its support and encouragement in the development of this study.

References

BRAGA, A.S.; TARQUI, J.L.Z.; SALIBA, A.P.M. Aplicação do método simplificado de Colby (1957) para cômputo da descarga sólida total em estação hidrossedimentométrica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 24., 2021. *Anais...* 2021.

COLBY, B.R. Relationship of unmeasured sediment discharge to mean velocity. *Transactions, American Geophysical Union*, v. 38, n. 5, 1957, p. 708–717.

GONZALEZ RODRIGUEZ, L.; MCCALLUM, A.; KENT, D.; RATHNAYAKA, C.; FAIRWEATHER, H. A review of sedimentation rates in freshwater reservoirs: recent changes and causative factors. *Aquatic Sciences*, v. 85, 2023.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). *Standards for Hydrographic Surveys (S-44)*. Edition 6.1.0. Monaco: IHO, 2020.

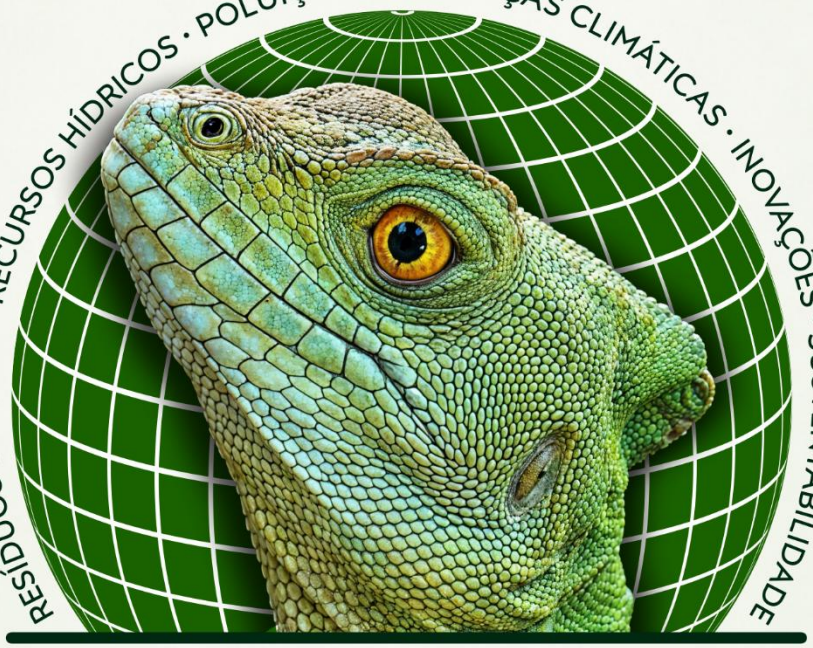
PERERA, D.; LAKHANKAR, T.; YOSHIMURA, C.; et al. Present and future losses of storage in large reservoirs due to sedimentation: a country-wise global assessment. *Sustainability*, v. 15, n. 1, 2022.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (USBR). *El Vado Reservoir 2007 Sedimentation Survey*. Denver: USBR, 2008.

WILSON, G.L.; RICHARDS, J.M. Procedural documentation and accuracy assessment of bathymetric maps and area/capacity tables for small reservoirs. Reston: U.S. Geological Survey, 2006. (Scientific Investigations Report 2006-5208).

ÁREA TEMÁTICA 13

INFRAESTRUTURA AZUL E RESILIÊNCIA COSTEIRA



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

INFRAESTRUTURAS VERDE-CINZA PARA RENATURALIZAÇÃO DE ÁREAS DE MANGUEZAIS NO ENTORNO DA PA-458 (BRAGANÇA–AJURUTEUA)

1 Paulo Henrique Costa, 2 Diana Maria Cancelli, 3 Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha, 4 Helder Rafael Nocko, 5 Leonardo Brustolon, 6 André Luciano Malheiros, 7Alex Alves, 8 Bruno Henrique Coutinho

1 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: paulo.costa@envexengenharia.com.br; 2 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: diana.cancelli@envexengenharia.com.br; 3 Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, e-mail: cynara@ufpr.br; 4 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: helder@envexengenharia.com.br; 5 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: leonardo.brustolon@envexengenharia.com.br; 6 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: andre@envexengenharia.com.br; 7 Conservação Internacional do Brasil, e-mail: aalves@conservation.org; 8 Conservação Internacional do Brasil, e-mail: bcoutinho@conservation.org;

Palavras-chave: Infraestrutura verde-cinza (IVC); Soluções baseadas na natureza (SbN); Restauração de manguezais.

Resumo

Este estudo analisa os impactos da implantação da rodovia PA-458 sobre a hidrodinâmica e a integridade ecológica de áreas de manguezal inseridas na Reserva Extrativista Marinha Caeté-Taperaçu, no município de Bragança (PA). A construção da rodovia, sobre aterro contínuo, desencadeou a interrupção da conectividade entre canais de maré, resultando em alterações no regime hidrodinâmico, aumento da salinidade e mortalidade da vegetação. Diante desse cenário, o trabalho propõe a aplicação integrada de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) e intervenções de engenharia para a restauração ambiental da área. A metodologia baseou-se na modelagem hidrodinâmica, realizada pelo sistema SisBaHiA®, com a simulação de vários cenários. Foram propostas intervenções como instalação de bueiros (*box culverts*), dragagem e reabertura de canais, associadas a soluções ecológicas como microcanais vegetados, biofiltração e plantio assistido de espécies de mangue. A priorização das alternativas foi realizada por meio de análise multicritério, integrando dimensões técnicas, ambientais, socioeconômicas e operacionais. Os resultados indicam que as intervenções promovem significativa recuperação da conectividade hidrológica, com o aumento da circulação das marés e expansão das áreas inundáveis, contribuindo para a redução da hipersalinidade e favorecendo a regeneração do manguezal. Estima-se a recuperação de até 505 hectares de vegetação, com expressivo aumento de biomassa e estoque de carbono, além de maior resiliência frente ao cenário de mudanças climáticas com o horizonte 2070. As soluções integradas apresentaram maior viabilidade, destacando-se a combinação de bueiros e microcanais. Conclui-se que a integração entre infraestrutura verde-cinza constitui uma estratégia eficaz para a restauração de manguezais degradados por intervenções antrópicas, promovendo benefícios ambientais e socioeconômicos. O uso da modelagem mostrou-se fundamental para subsidiar a tomada de decisão, evidenciando o potencial dessa abordagem para viabilizar projetos capazes de aumentar a capacidade de adaptação de ecossistemas costeiros frente às mudanças climáticas.

Introdução

Os manguezais são ecossistemas costeiros de grande relevância ecológica, formados por comunidades vegetais adaptadas a condições de salinidade elevada, inundações periódicas e solos alagadiços, caracterizados pela presença de árvores e arbustos adaptados, como os mangues. (Silva, Cardoso e Araújo, 2024).

Entre os inúmeros serviços ambientais prestados nesse tipo de ambiente, destaca-se o papel fundamental na ciclagem do carbono atmosférico (CO_2); mitigação do efeito estufa; proteção da linha de costa; elevada produtividade biológica na forma de matéria orgânica que sustenta complexas cadeias alimentares nos estuários; além de sua função como área de repouso, nidificação e berçário para diversas espécies de aves, peixes, moluscos e crustáceos, muitas delas de importância econômica para a pesca (Donato *et al.*, 2011; Souza *et al.,* 2018; Twilley; Chen; Hargis, 1992). Assim, os manguezais são ambientes notadamente sensíveis e podem sofrer diferentes impactos decorrentes das atividades antrópicas.

Particularmente, a expansão da infraestrutura viária em regiões costeiras tropicais e subtropicais, especialmente sobre extensas áreas úmidas, tem provocado alterações significativas nos regimes hidrológicos e hidrodinâmicos (Teutli-Hernández; Silveira, 2018; Cardenas *et al.*, 2022). A construção de estradas em zonas de manguezal pode modificar padrões de circulação hidrodinâmicos, tanto espaciais quanto temporais, levando à perda de grandes áreas de vegetação e comprometendo a integridade ecológica dos ecossistemas costeiro-marinhos (Alongi, 2008; Teutli-Hernández; Silveira, 2018; Cardenas *et al.*, 2022). Além disso, Becker (1990) destaca que a implantação de estradas induz a ocupação sobre o território, o que pode acarretar em desdobramentos para além da própria estrada e sua área de influência direta, como o surgimento de novas vilas, povoados e aglomerações.

Neste contexto, destaca-se como um exemplo emblemático de degradação ocasionada por projetos de desenvolvimento da região amazônica, a construção da rodovia PA-458, que liga a cidade de Bragança à praia de Ajuruteua, no Estado do Pará (Oliveira, 2015; Alves, 2016; Oliveira; Pinto; Correia, 2017; Silva; Rocha; Nunes, 2023). A estrada começou a ser aberta no ano de 1973 e teve sua pavimentação concluída em 1991. O empreendimento foi um marco no desenvolvimento regional e ocasionou mudanças socioeconômicas, ambientais e culturais. À época, era destacada a possibilidade de integração do litoral do município

ao sistema rodoviário estadual, estimulando o desenvolvimento do turismo e melhorando aspectos de logística da região. Entretanto, a falta de observação de particularidades locais acarretou em consequências que perduram até os dias de hoje.

Estudos mostram que o aterro construído para a implantação da rodovia interrompeu a hidrodinâmica natural do sistema ~~e~~, dificultando a regeneração das áreas alagadas, interferindo no equilíbrio ambiental da área (Silva *et al*., 2023; Dantas; Silva, 2022). As obras ocasionaram a retirada de cerca de 315 hectares de vegetação nativa de mangue, sendo que o barramento do fluxo dos canais de maré ~~rios~~ e das águas subsuperficiais causou a morte de uma extensa área de manguezais adjacentes. A reprodução de diversas espécies, como o caranguejo-uçá, que é fundamental para a subsistência da população local, também foi prejudicada. (Oliveira e Henrique, 2018)

Neste cenário, devido aos crescentes desafios impostos pela ocupação humana e o contexto de mudanças climáticas, soluções tradicionais de engenharia têm se mostrado insuficientes para conter os impactos ambientais. Portanto, é evidenciada a necessidade de abordagens inovadoras que integrem elementos naturais como parte ativa das soluções de infraestruturas. Destacam-se três conceitos interrelacionados: Soluções Baseadas na Natureza (SbN), Infraestrutura Verde e Infraestrutura Cinza.

As SbNs, segundo a *International Union for Conservation of Nature* (IUCN, 2016), consistem em ações de proteção, gestão e restauração de ecossistemas para o enfrentamento de desafios sociais, que geram benefícios simultâneos à biodiversidade e ao bem-estar humano. Essa definição está diretamente associada às infraestruturas verdes, que consistem na preservação, restauração ou uso estratégico de ecossistemas como florestas, áreas agrícolas, zonas ripárias e manguezais, integrando-os à infraestrutura para oferecer serviços mais sustentáveis e com menor custo (Browder *et al.*, 2019). Em contraste, a infraestrutura cinza envolve obras de engenharia tradicionais, como diques, canais e reservatórios, que, embora eficazes no curto prazo, apresentam maior custo de manutenção e vida útil limitada.

O presente trabalho tem como objetivo analisar a aplicação de solução integrada entre SbNs e infraestrutura cinza na restauração de manguezais degradados pela implantação da rodovia PA-458. Para tanto, o estudo propõe simular o restabelecimento das condições naturais das áreas úmidas por meio da proposição de alternativas de Infraestruturas Verde-Cinza (IVCs) em áreas de manguezal no município de Bragança (PA). Tais intervenções visam promover a reconexão dos canais de maré interceptados, contribuindo para a recuperação estrutural e funcional do ecossistema, bem como garantir, a longo prazo, sua resiliência frente às mudanças climáticas e às pressões antrópicas.

Área de Estudo

O município de Bragança está inserido no Bioma Amazônico, em uma região que abriga o maior sistema contínuo de manguezais do mundo e integra a Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia (CMMA), considerada um *hotspot* global de intensas mudanças na cobertura de manguezais (Thomas *et al.*, 2017). Segundo o Censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2022, Bragança possui 123.082 habitantes, com uma densidade demográfica de 57,93 hab./km^2. Sua classificação hierárquica é definida como Centro de Zona A (IBGE, 2017), possuindo importante inserção logística pela presença de rodovias federais e estaduais, além dos acessos hidroviários através da Baía do Caeté, Baía do Maiaú e Furo Grande.

A área insere-se em uma complexa planície fluviomarinha, caracterizada pela presença de planícies de intermaré, extensas florestas de manguezal e áreas de elevada salinidade superficial, como as Salinas dos Roques e a Lagoa Salina. O sistema hidrográfico é composto por uma rede intrincada de canais estuarinos e "furos" de maré, sob forte influência do estuário do rio Caeté e do Furo do Pará. O funcionamento desse ecossistema é regido por uma dinâmica de macromarés, com amplitudes que podem atingir até 4 metros diariamente, condicionando a inundação periódica, a modelagem dos canais e o equilíbrio salino necessário à manutenção dos manguezais. Essa dinâmica favorece elevada produtividade biológica e a constante renovação de nutrientes, sustentando espécies de relevância ecológica e econômica, como peixes, crustáceos e moluscos (Wolff *et al.*, 2000).

O trecho da rodovia PA-458 analisado situa-se no interior da Reserva Extrativista Marinha Caeté-Taperaçu (REM Caeté-Taperaçu), unidade de conservação de grande relevância ecológica e socioeconômica, voltada à conservação da biodiversidade e ao extrativismo tradicional. A Área Diretamente Afetada (ADA) delimitada, correspondente ao traçado da rodovia e suas áreas adjacentes, localiza-se no interflúvio das baías de Taperaçu e Caeté, fazendo com que a rodovia atue como uma barreira à conectividade da rede hídrica. Em alguns trechos, onde existiam canais naturais de ligação entre os estuários (os chamados "furos"), foram construídas pontes com o objetivo de manter o fluxo hídrico.

Apesar dessas intervenções, a interrupção parcial em diversos pontos resultou na formação de depressões permanentemente alagadas e comprometeu a regeneração natural das espécies de mangue (Fernandes *et al.*, 2007; Cardenas *et al.*, 2022). A construção da rodovia, implantada sobre aterro contínuo que atravessa 26 km de planície costeira, modificou a geomorfologia local e atua como uma barreira física à hidrodinâmica natural. Esse bloqueio desconectou diversos canais e causou uma série de reações em cadeia. O peso do aterramento resultou na compactação dos sedimentos e no ressecamento do solo adjacente, originando rachaduras sob os bosques de mangue, além de propiciar a invasão de areia sobre o solo predominantemente lodoso (Lara; Cohen, 2003 apud Oliveira, 2015; Fernandes *et al.*, 2007).

A restrição do fluxo das marés levou a uma baixa frequência de inundação que, associada à alta taxa de evapotranspiração impulsionada pela intensa radiação solar na região, elevou drasticamente a salinidade nos sedimentos (Lara; Cohen, 2006; Cardenas *et al.*, 2022). A somatória desses impactos culminou na retração dos manguezais e na mortalidade de extensas áreas de vegetação, especialmente ao redor do Km 17 da rodovia.

Além disso, as áreas do entorno encontram-se sob pressão de diversos fatores antrópicos, como extração de madeira, caça predatória, pisoteamento, descarte de resíduos e expansão de construções. Esses fatores são potencializados por condicionantes naturais, como a atuação das marés e o regime pluviométrico, que intensificam os impactos sobre o ecossistema

(Gomes; Fernandes, 2006). Simultaneamente, o avanço da ocupação urbana, especialmente ao sul da rodovia, configura-se como um vetor contínuo de pressão sobre a integridade e a resiliência dos manguezais.

Concepção das estruturas

Partindo dos preceitos teóricos estabelecidos, a concepção das intervenções para a mitigação dos impactos na rodovia PA-458 fundamentou-se numa abordagem híbrida, atuando no centro do espectro das IVCs. A engenharia tradicional (cinza) assume um papel necessário para romper a barreira imposta pelo aterro viário. Em complementaridade, a infraestrutura verde atua nas extremidades destas obras e visa restaurar a funcionalidade hídrica e biológica do ecossistema, além de aumentar a longevidade das obras realizadas.

Entre as soluções cinza, optou-se pela instalação de bueiros retangulares de concreto armado (*box culverts*) sob a rodovia, com a finalidade de restabelecer o fluxo de água entre os dois lados. Também foi prevista a realização de dragagens e escavações, voltadas à retirada de materiais sedimentados no fundo dos canais, com o objetivo de aumentar ou restaurar a profundidade dos cursos hídricos a fim de restabelecer as vazões naturais.

No conjunto de soluções verdes, foram priorizadas estratégias voltadas à recuperação da vegetação e ao manejo dos fluxos em escala local. O plantio assistido, por meio da regeneração ativa com espécies tolerantes à hipersalinidade, como *Avicennia germinans* e *Laguncularia racemosa*, foi definido como forma de reativar a cobertura vegetal e estimular a sucessão natural. Além disso, propõe-se a implantação de microcanais vegetados, consistindo na escavação de canais rasos com taludes estabilizados por gramíneas halófitas, com a função de drenar bolsões de água e reduzir a salinidade do solo. Adicionalmente, essas medidas contribuem para diminuir a ação de processos erosivos nas margens, o que pode prolongar a durabilidade das dragagens. Complementarmente, foram incluídas cercas de biofiltração, estruturas permeáveis construídas com bambu ou madeira, associadas a faixas de macrófitas filtrantes, destinadas ao controle da deposição de sedimentos, à modulação de microfluxos e à redução de áreas com água parada.

Foram priorizadas intervenções que possibilitam a restauração de vegetação complementada por soluções que restabeleçam os fluxos hidrodinâmicos, e que possam envolver de forma ativa a comunidade local. As ações propostas estão em consonância com o ordenamento previsto no Plano de Manejo da REM Caeté-Taperaçu e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6,11, 13, 14, 15 e 17, da Organização das Nações Unidas (ONU).

Metodologia

Para a simulação do comportamento hidrodinâmico, foi utilizado o sistema de modelos SisBaHiA® (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), amplamente aplicado em ambientes estuarinos e costeiros. O modelo de circulação hidrodinâmica foi implementado no estuário do rio Caeté, que influencia diretamente a área do entorno da rodovia PA-458.

A malha numérica adotada nas modelagens foi construída com elevada resolução espacial, permitindo a representação detalhada dos furos, das profundidades, dos canais de maré e das intervenções propostas. Dados de batimetria, variação de maré, ventos e vazões do rio Caeté foram usadas na simulação. O modelo foi calibrado e validado com base em dados medidos, de modo a representar as condições hídricas locais. A partir da calibração, foram simulados cenários de intervenção voltados à restauração da configuração anterior à implantação da rodovia, incluindo a reconstituição de canais obstruídos e a recomposição do regime de inundação nas áreas impactadas.

Para as simulações, foram definidos três cenários com duração correspondente a um ano hidrológico, a fim de contemplar períodos chuvosos e de estiagem: (1) Cenário atual (diagnóstico): considerou a configuração existente dos canais, sem intervenções, utilizando a mesma grade numérica empregada na calibração; (2) Cenário Futuro (prognóstico): incorporou as intervenções propostas, passíveis de representação na malha e simulação hidrodinâmica; (3) Cenário 2070 (prognóstico): considerou a mesma configuração do cenário futuro, acrescida de uma elevação do nível médio do mar projetada para o horizonte de 50 anos, com base em projeções do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

Para os cenários 2 e 3, foi elaborada uma nova grade numérica que incorpora as seguintes IVCs: Intervenção 1 - instalação de *box culverts* sob o aterro da rodovia; Intervenção 2 - aprofundamento e abertura de canais de conexão até a margem da estrada; Intervenção 3 - desobstrução hidrodinâmica por meio de dragagem para aprofundamento na entrada do Furo do Pará; Intervenção 4 - abertura de um canal de escoamento na região das Salinas; Intervenção 5 (5.1, 5.2 e 5.3), conjunto de soluções, combinando a abertura e o aprofundamento de canais acoplados à instalação de *box culverts* em três pontos distintos da rodovia (Figura 01). Essas intervenções foram representadas na malha de elementos finitos, permitindo avaliar seus efeitos sobre a hidrodinâmica do sistema.

O dimensionamento dos bueiros seguiu as diretrizes do "Manual de Drenagem de Rodovias" do Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes (DNIT, 2006). Foram adotados bueiros celulares de concreto, do tipo BSCC 1,5 x 1,5, com seção transversal retangular de 1,5 m de base por 1,5 m de altura.

Para os canais e microcanais, as estimativas de volume de material a ser removido foram obtidas pela comparação entre os dados batimétricos atuais e os projetados após as intervenções. No caso das intervenções associadas ao Furo do Pará, a área foi subdividida em compartimentos, permitindo a estimativa de volumes de material a serem dragados em diferentes trechos. Para as demais intervenções, os cálculos consideraram diferenças de cota, área e volume através de *softwares* de geoprocessamento (QGIS e ARCGIs).

A Figura 01 apresenta a localização das infraestruturas, o contexto locacional, a concepção e resultado esperado, bem como o dimensionamento dos *box culverts*, que associado aos microcanais vegetados caracterizam as principais infraestruturas propostas.

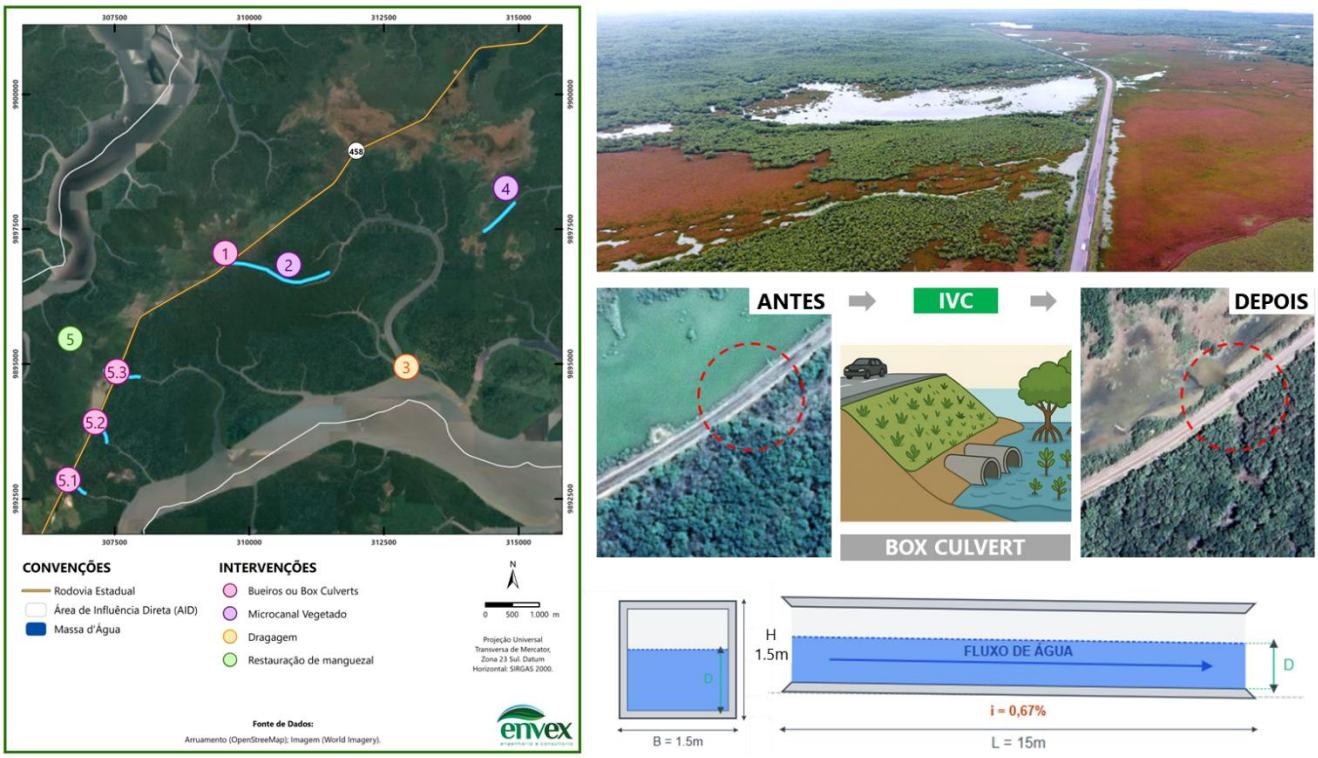


Figura 01: Contexto, concepção e localização das infraestruturas propostas.
Fonte: EnvEx Engenharia e Consultoria (2026)

A priorização das IVCs foi conduzida por meio de análise multicritério, integrando resultados quantitativos das simulações hidrodinâmicas e das estimativas de recuperação de biomassa e carbono com informações qualitativas das intervenções. Foram definidos 16 critérios, organizados em quatro categorias temáticas: hidrológico-morfológica (30%), ambiental-ecológica (20%), socioeconômica-institucional (20%) e econômico-operacional (30%), sendo cada critério avaliado em escala ordinal de 0 a 3.

Na categoria hidrológico-morfológica foram considerados os critérios de efetividade da reconexão hídrica, avaliada pelo restabelecimento da circulação de maré; reativação ecológica de áreas alagáveis, associada à eliminação de bolsões isolados; estabilidade morfológica, relacionada aos riscos de erosão e assoreamento; e resiliência a mudanças climáticas, referente à capacidade de manutenção da função hidrológica em cenários futuros. Na categoria ambiental-ecológica, incluíram-se os critérios de recuperação de biomassa e carbono, com base na área potencialmente restaurada; incremento da biodiversidade, associado à ampliação de habitats e corredores ecológicos; impactos ambientais temporários, relacionados às perturbações decorrentes das obras; e risco de impactos permanentes, considerando alterações de difícil reversão.

Na dimensão socioeconômica-institucional, foram avaliados os critérios de interferência no tráfego rodoviário e hidroviário durante a implantação; benefícios sociais diretos, especialmente para pesca e navegação; participação comunitária, relacionada ao engajamento local nas ações de monitoramento; e alinhamento com ODS e premissas norteadoras. Por fim, na categoria econômico-operacional, foram considerados os critérios de relação custo-benefício; custo e complexidade de manutenção, incluindo risco de obstrução; facilidade de licenciamento ambiental; e interdependência de outras intervenções para o pleno funcionamento das soluções.

A partir da atribuição das notas, foram calculados os Índices de Viabilidade Parciais para cada categoria, posteriormente integrados por média ponderada, resultando no Índice de Viabilidade Consolidado, utilizado para a hierarquização das alternativas quanto à sua capacidade de restabelecer a dinâmica hidrológica e ecológica da área de estudo.

Resultados

A partir da simulação da implementação das intervenções propostas, observam-se benefícios expressivos associados à retomada da circulação hídrica em áreas anteriormente desconectadas. No Furo do Pará, a combinação entre dragagem e instalação de bueiros possibilita o restabelecimento do fluxo de água entre os dois lados da rodovia, considerando o regime de marés. Na região das Salinas, a abertura de canais favorece a formação de áreas de inundação que contribuem para a renovação da água e para a redução de condições de hipersalinidade. Já no trecho sul da rodovia, a inserção de bueiros promove a reconexão entre setores de montante e jusante, ampliando a conectividade hidrológica.

O modelo demonstrou que as intervenções de desobstrução, como a dragagem na entrada do Furo do Pará, e a abertura de microcanais na região das Salinas e nos setores ao sul permitiram que a onda de maré voltasse a se propagar para o interior das planícies anteriormente isoladas. Em comparação ao cenário atual, o cenário 2 apresenta aumento expressivo da conectividade hidráulica, com maior continuidade espacial dos fluxos e ampliação das áreas sujeitas à inundação periódica.

As análises de velocidade e das probabilidades de ocorrência de escoamento evidenciam mudanças significativas nas condições hidrodinâmicas. No cenário atual, predominam extensas áreas com baixas velocidades de corrente (inferiores a 0,1 m/s). Com a implementação das intervenções, observa-se aumento da frequência de correntes com velocidades superiores a 0,1 m/s, indicando maior eficiência na renovação das águas. Esse padrão é evidente nas áreas adjacentes ao Furo do Pará e na região das Salinas (Figura 02).

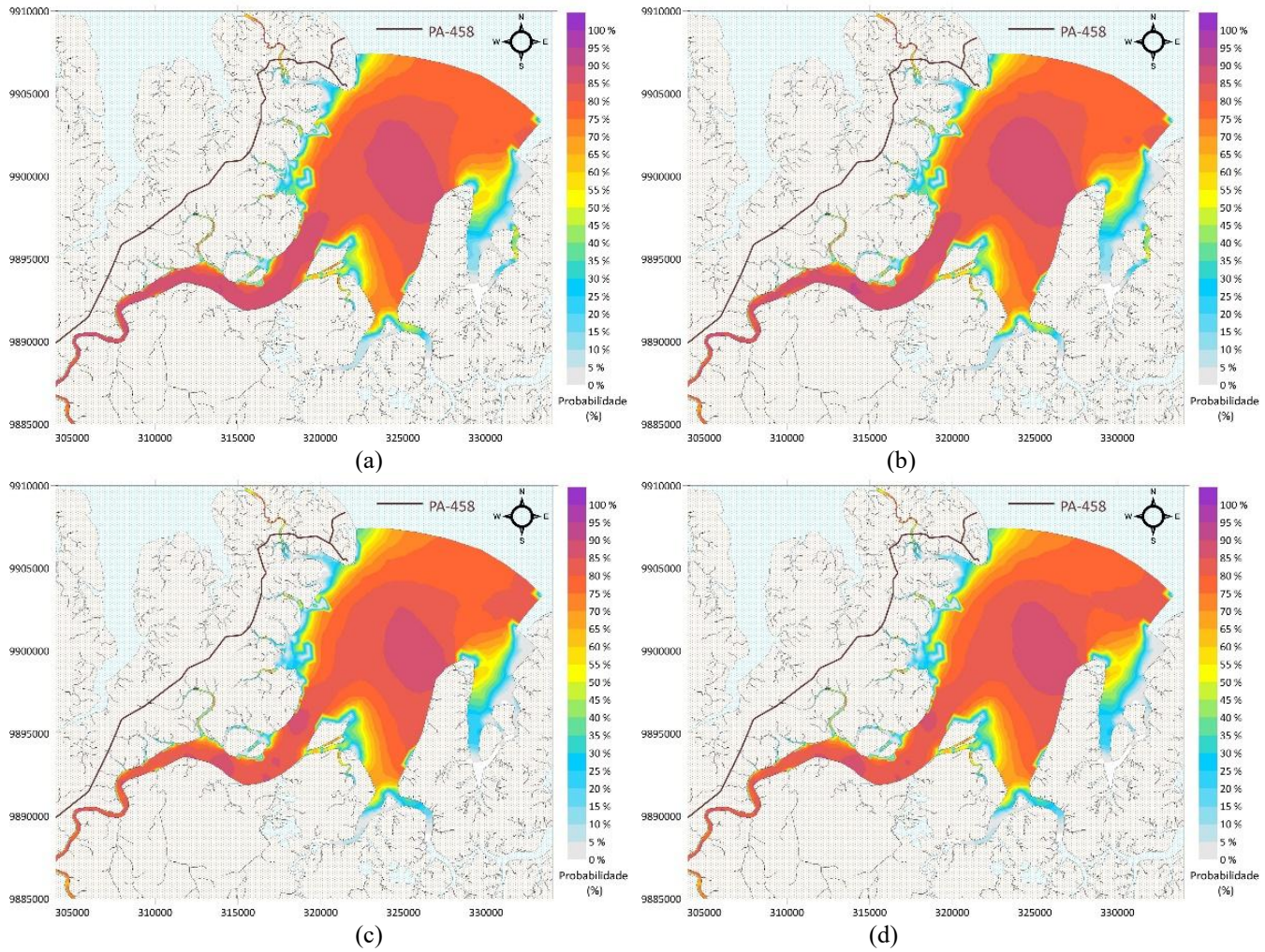


Figura 02: Probabilidade de ocorrência de velocidades de corrente maior do 0,1 m/s para o período de: (a) estiagem (11 de agosto e 12 de fevereiro) – cenário atual, (b) de cheia (13 de fevereiro e 10 de agosto) – cenário atual, (c) de estiagem (11 de agosto e 12 de fevereiro) – cenário 2070 e (d) e cheia (13 de fevereiro e 10 de agosto) – cenário 2070.
Fonte: EnvEx Engenharia e Consultoria (2026)

Os mapas de inundação indicam aumento da área máxima inundada, especialmente nas regiões associadas às intervenções. Além disso, a distribuição espacial dos níveis d'água durante eventos de preamar (maior elevação da maré) demonstra maior homogeneidade entre os dois lados da rodovia, evidenciando a redução das diferenças anteriormente impostas pela rodovia.

A intensificação da circulação associada com as variações dos níveis de maré atua na diluição das concentrações salinas. Como resultado, no cenário 2, estima-se a recuperação de aproximadamente 505 hectares de manguezal, correspondendo a cerca de 165 mil toneladas de biomassa, com potencial de estoque de carbono (acima e abaixo do solo) de cerca de 78 mil toneladas. Para o cenário 2070, considerando a elevação do nível médio do mar, observa-se incremento adicional das áreas inundáveis, da ordem de 108 hectares, o que potencializa os processos de troca hídrica e resulta em um aumento estimado para cerca de 200 mil toneladas de biomassa e aproximadamente 94,5 mil toneladas de carbono estocado.

Os resultados do dimensionamento hidráulico indicam que os bueiros propostos apresentam capacidade adequada para suportar as vazões simuladas. As vazões máximas de enchente e vazante permanecem inferiores à vazão admissível dos dispositivos (5,85 m³/s), evidenciando que as estruturas são suficientes para garantir o escoamento previsto sem restrições significativas a longo prazo.

Com relação aos índices de viabilidade construídos, concluiu-se que soluções integradas, de IVCs, tendem a apresentar melhor desempenho quando comparadas a intervenções isoladas. A intervenção composta por bueiros do tipo *box culvert*

associados a microcanais no Furo do Pará (1 e 2) apresentou o maior índice de viabilidade, alcançando 2,45 pontos. Na sequência, a intervenção 5, que conta com um conjunto de ações para a restauração do manguezal, também apresentou desempenho elevado (2,28), com destaque para os benefícios ecológicos e sociais, especialmente no que se refere à recuperação de biomassa e ao suporte a atividades extrativistas tradicionais.

As intervenções híbridas que associam bueiros e microcanais em diferentes trechos da área de estudo apresentaram condições operacionais compatíveis com os objetivos do projeto, porém obtiveram níveis de viabilidade que variam de moderados a elevados, por estarem associadas a maior necessidade de manutenção ou por produzirem efeitos muito localizados. A implantação de microcanais em áreas específicas, como na região da Salina dos Roques, apresentou viabilidade intermediária e resultados satisfatórios. Já a obra de dragagem considerada de forma isolada (Intervenção 3) apresentou o menor desempenho relativo, em função de custos elevados, maior complexidade operacional e potenciais impactos associados, sendo recomendada apenas como medida complementar às demais intervenções.

Considerações Finais

A ocupação humana pode ocasionar severa degradação em ambientes sensíveis como os manguezais. Especialmente, aterros construídos em áreas úmidas, no caso para a construção de infraestruturas viárias, causam impactos de diversas ordens. Nesse sentido, a adoção de soluções integradas, baseadas na combinação entre IVCs, mostra-se uma opção viável para a reversão desses quadros, utilizando o potencial das SbNs como estratégia para alcançar o uso sustentável.

Considerando as características da área de estudo, marcada por uma dinâmica de macromaré e elevada sensibilidade ambiental, os resultados mostram que alterações na conectividade dos canais são capazes de gerar respostas significativas no funcionamento do sistema. Ao atuar como barreira física, a rodovia PA-458 intensificou processos de degradação do mangue, alterando as dinâmicas de conectividade hidrossedimentológicas pré-existentes na área.

A abordagem adotada na concepção das intervenções demonstrou que a integração entre soluções de engenharia e estratégias ecológicas é essencial para o sucesso das ações de restauração. Enquanto as infraestruturas cinza atuam na remoção das barreiras físicas impostas pela rodovia e na restauração dos canais adjacentes, as soluções verdes contribuem para a estabilização dos processos. Essa complementaridade reforça a necessidade de planejamento integrado em projetos de restauração ambiental em zonas costeiras.

A utilização de modelagem hidrodinâmica como ferramenta mostrou-se eficaz para a avaliação da efetividade das intervenções propostas. A simulação de diferentes cenários permitiu identificar mudanças nos padrões de circulação e na extensão das áreas inundadas, fornecendo suporte técnico para a tomada de decisão e para a priorização das alternativas mais viáveis.

Os resultados obtidos confirmam que o restabelecimento da conectividade hidrodinâmica promove melhorias significativas nas condições ambientais do sistema, com a recuperação de áreas de manguezal. Além disso, as estimativas de incremento de biomassa e estoque de carbono reforçam o papel dessas intervenções na mitigação das mudanças climáticas. A análise dos índices de viabilidade também demonstrou que soluções integradas, baseadas em IVC, apresentam melhor desempenho, consolidando-se como alternativas para a recuperação efetiva de áreas degradadas.

Além dos efeitos físicos e ecológicos, as intervenções apresentam implicações positivas no sistema socioeconômico, ao favorecer a melhoria das condições ambientais que sustentam atividades tradicionais, como a pesca e a navegação. A restauração da vegetação de mangue contribui para a formação de ambientes com maior disponibilidade de recursos naturais. Simultaneamente, propõe-se o envolvimento das comunidades locais nas ações de monitoramento, para que as atividades de manejo fortaleçam a continuidade das intervenções e a responsabilidade na gestão territorial.

Outro aspecto relevante refere-se à adaptação do sistema frente à elevação do nível médio do mar. No cenário projetado para 2070, observa-se que as intervenções aumentam a capacidade do estuário de acomodar variações no nível da água, reduzindo a vulnerabilidade a mudanças futuras. Vale ressaltar que o cenário 2070 não alterou o aporte fluvial do sistema, o que pode ocasionar variações de níveis d'água significativos quando da ocorrência de eventos extremos. A expansão das áreas inundáveis e a manutenção da circulação hídrica contribuem para a resiliência do ecossistema, permitindo sua adaptação gradual às novas condições ambientais, o que é particularmente relevante no contexto de mudanças climáticas.

Agradecimentos

Agradecemos à Conservação Internacional Brasil por permitir publicar parte do "Estudo de alternativas de infraestruturas verde-cinza visando à renaturalização e ao restabelecimento da circulação hidrodinâmica nos canais de maré interceptados pela PA-458 (Bragança – Ajuruteua)" referente ao Contrato de Serviço 6011317 celebrado entre a EnvEx Engenharia e Consultoria Ltda e a Conservação Internacional do Brasil, executado entre os meses de abril e dezembro de 2025.

Referências Bibliográficas

ALONGI, D. M. Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 76, n. 1, p. 1–13, 2008. ISSN 0272-7714. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024. Acesso: jun. 2025.

ALVES, A. B. Estrada Bragança-Ajuruteua: desenvolvimento e progresso (1975-1984). **Revista Ars Historica**, Rio de Janeiro, n. 12, p. 229-250, jan./jun. 2016. ISSN 2178-244X.

BECKER, B. K. Fronteira e urbanização repensadas. *In*: BECKER, B. K.; MIRANDA, M.; MACHADO, L. O. **Fronteira Amazônica**: questões sobre a gestão do território. Brasília: Editora UnB, 1990. p. 131-144.

BROWDER, G. S. OZMENT, I. REHBERGER BESCOS, T. GARTNER, AND G-M LANGE**. Integrating Green and Gray: Creating Next Generation Infrastructure**. Washington, DC: World Bank and World Resources Institute, 2019.

CARDENAS, S. M. M.; COHEN, M. C. L.; RUIZ, D. P. C.; SOUZA, A. V.; GOMEZ-NEITA, J. S.; PESSENDA, L. C. R.; CULLIGAN, N. Death and regeneration of an Amazonian mangrove forest by anthropic and natural forces. **Remote Sensing**, v. 14, p. 6197, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/rs14246197. Acesso: jun. 2025.

DANTAS, D. A.; SILVA, S. N. Injustiça ambiental, conflitos e resistência: pescadoras artesanais no litoral paraense. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 36, n. 106, p. 303-321, 2022. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ea/a/6rjtbfxWNtMMgVC5Jp6tWtL/?lang=pt. Acesso em: 11 abr. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de drenagem de rodovias**. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006.

DONATO, D. C.; KAUFFMAN, J. B.; MURDIYARSO, D.; KURNIANTO, S.; STIDHAM, M.; KANNINEN, M. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. **Nature Geoscience**, v. 4, p. 293-297, 2011.

FERNANDES, M. E. B.; FERNANDES, J. S.; MURIEL-CUNHA, J.; SEDOVIM, W. R.; GOMES, I. A.; SANTANA, D. S.; SAMPAIO, D. S.; ANDRADE, F. A. G.; OLIVEIRA, F. P.; BRABO, L. B.; *et al.* Efeito da construção da rodovia PA-458 sobre as florestas de mangue da Península Bragantina, Bragança, Pará, Brasil. **Uakari**, Manaus, v. 3, p. 55–63, 2007.

GOMES, G. C.; FERNANDES, M. E. B. Variação sazonal da densidade de Ucides cordatus (Linnaeus, 1763) (Crustacea, Brachyura, Ocypodidae) no manguezal do Rio Caeté, Bragança, Pará, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. Ciências Naturais, Belém, v. 1, n. 3, p. 85-96, set.-dez. 2006. Disponível em: http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1981-81142006000300005. Acesso em: 14 mai. 2025.

LARA, R. J.; COHEN, M. C. L. Sediment porewater salinity, inundation frequency and mangrove vegetation height in Bragança, North Brazil: an ecohydrology-based empirical model. **Wetlands Ecology and Management**, Dordrecht, v. 14, p. 349–358, 2006.

OLIVEIRA, M. V. C. **A estrada para o "progresso": política, cultura e natureza em Bragança, Pará (1970-1996)**. 2015. Dissertação (Mestrado em História) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Belém, 2015.

OLIVEIRA, M, V, C.; HENRIQUE, M. C. "No meio do caminho havia um mangue: impactos socioambientais da estrada Bragança-Ajuruteua, Pará." História, Ciências, Saúde-Manguinhos 25.2 (2018): 497-514.

OLIVEIRA, S. F. C.; PINTO, P. V. S.; CORREA, I. C. A. Cartografia, instrumento de controle e fiscalização da gestão de ecossistemas: estudo de caso dos impactos socioambientais nas áreas de mangues do município de Bragança-PA. *In*:

CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 27., 2017, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: SBC, 2017. p. 1415-1419.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. HIRAISHI, T.; KRUG, T.; TANABE, K.; SRIVASTAVA, N.; BAASANSUREN, J.; FUKUDA, M.; TROXLER, T. G. (eds). Suíça: IPCC, 2013.

SILVA, Mônica Lima da; ROCHA, Fátima; NUNES, Ana Luíza. No meio do caminho havia um mangue: impactos socioambientais da estrada Bragança-Ajuruteua, **Pará. História, Ciências, Saúde** – Manguinhos, Rio de Janeiro, v. 30, n. 1, p. 165-186, jan./mar. 2023. Disponível em: https://www.scielo.br/j/hcsm/a/y8sTYpTLG5ynjZ4fjFpkm8x/?lang=pt. Acesso em: 11 abr. 2025.

SILVA, M. L.; ROCHA, F.; NUNES, A. L. No meio do caminho havia um mangue: impactos socioambientais da estrada Bragança-Ajuruteua, Pará. **História, Ciências, Saúde** – Manguinhos, Rio de Janeiro, v. 30, n. 1, p. 165-186, jan./mar. 2023. Disponível em: https://www.scielo.br/j/hcsm/a/y8sTYpTLG5ynjZ4fjFpkm8x/?lang=pt. Acesso em: 11 abr. 2025.

SOUZA, C. A.; DUARTE, L. F. A.; JOÃO, M. C. A.; PINHEIRO, M. A. A. Biodiversidade e Conservação dos Manguezais: importância Bioecológica e Econômica. *In*: PINHEIRO, M. A. A.; TALAMONI, A. C. B. (org.). **Educação Ambiental sobre Manguezais**. São Vicente: UNESP, Instituto de Biociências, Câmpus do Litoral Paulista, 2018. p. 16-56.

TEUTLI-HERNÁNDEZ, C.; SILVEIRA, J. A. H. The success of hydrological rehabilitation in mangrove wetlands using box culverts across coastal roads in northern Yucatán (SE, México). In: MAKOWSKI, C.; FINKL, C. W. (ed.). **Threats to mangrove forests**. Cham: Springer International Publishing, 2018. (Coastal Research Library, v. 25). Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-73016-5_28. Acesso em: jun. 2025.

THOMAS, N.; LUCAS, R.; BUNTING, P.; HARDY, A.; ROSENQVIST, A.; SIMARD, M. Distribution and drivers of global mangrove forest change, 1996–2010. **PLoS ONE**, v. 12, p. e0179302, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179302. Acesso: jun. 2025.

TWILLEY, Robert R; CHEN, R H; HARGIS, T. Carbon sinks in mangroves and their implications to carbon budget of tropical coastal ecosystems. **Water, Air Soil Pollut**. 64, 265–288, 1992.

WOLFF, M.; KOCH, V.; ISAAC, V. A trophic Flow Model of the Caeté Mangrove Estuary (North Brazil) With Considerations for the Sustainable Use of its Resources. Estuarine, Coastal and Shelf Science. v. 50, p. 789-803, 2000.

EVENTOS EXTREMOS E RESILIÊNCIA COSTEIRA NA CIDADE DO RECIFE: O PAPEL DA INFRAESTRUTURA AZUL NA PROTEÇÃO DA CIDADE

1 Cristiane Bento dos Santos, 2 Íris Maria Soares de Melo,
1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, cristiane.bento@ufrpe.br; 2 Universidade Federal Rural de Pernambuco, iris.soares@ufrpe.br;

Palavras-chave: Recife; infraestrutura azul; vulnerabilidade costeira.

Resumo

A urbanização acelerada no Brasil tem resultado na ocupação das áreas costeiras, o que torna as cidades litorâneas mais vulneráveis às mudanças climáticas e a eventos extremos como chuvas fortes, inundações e a elevação do nível do mar. Nessa perspectiva, o Recife se destaca devido às suas características geográficas e físicas, como a baixa altitude, a presença de rios e a proximidade com o oceano, o que torna mais provável a ocorrência de alagamentos e processos erosivos. Este estudo pretende analisar as estratégias que a gestão municipal tem utilizado para amenizar os efeitos desses fenômenos, concentrando-se na infraestrutura azul. A pesquisa, que é de caráter qualitativo, baseou-se em pesquisa bibliográfica e documental, além de informações institucionais e científicas. Os resultados indicam que a implementação de jardins filtrantes, parques lineares e reservatórios de retenção pode melhorar a drenagem urbana, reduzir os efeitos das chuvas intensas e ainda trazer benefícios ambientais e sociais. Por outro lado, as intervenções costeiras continuam a ser majoritariamente baseadas em abordagens de engenharia tradicional, como o uso de enrocamento e a ampliação da faixa de areia. Em suma, apesar de os avanços na implementação das estratégias de adaptação serem visíveis, sua eficácia depende, ainda, da ampliação, integração e continuidade das políticas públicas, requerendo uma visão mais ampla para fortalecer a resiliência urbana e costeira.

Introdução

O Brasil é um país com uma intensa urbanização. Esse fato foi constatado pelo censo do IBGE de 2022, no qual pode ser observado que, de 203,1 milhões de pessoas da população brasileira, 87,4% viviam em áreas urbanas, crescendo em 0,82% ao ano entre 2010 e 2022. Em virtude desse crescimento urbano, nota-se que cada vez mais essas ocupações vêm ocorrendo em zonas costeiras, situação que ocorre desde o período de colonização do Brasil em que, de acordo com STRAFORINI (2008, apud OLIVEIRA; SANTOS, 2014, P. 83), os portugueses utilizaram a faixa litorânea na ocupação criando as capitanias hereditárias, que passou a ser bastante utilizada no processo do ciclo da cana de açúcar e agricultura, devido a sua região privilegiada de mercadorias pelo oceano Atlântico, formando assim as cidades litorâneas.

As cidades litorâneas, caracterizadas por sua proximidade com o mar, tendo o seu clima influenciado pela maritimidade e possuindo paisagens como praias, dunas, restingas, manguezais, frequentemente sofrem com o crescimento urbano desordenado e o aumento das construções próximas ao mar. Essas regiões também são extremamente vulneráveis às alterações climáticas, alagamentos, elevação do nível do mar, necessitando, dessa forma, de um plano de adaptação que integre não só a gestão urbana, como também a gestão costeira sendo uma alternativa diante das atuais e futuras mudanças do clima.

De acordo com a ONU, o mundo no cenário atual está aquecendo mais rapidamente do que em qualquer outro momento registrado na história, mudando os padrões climáticos e perturbando o equilíbrio da natureza. Em decorrência disso, é estimado que os eventos extremos tornem- se cada vez mais frequentes, impactando principalmente as cidades tropicais e litorâneas por meio da ocorrência de tempestades severas, agravamento das chuvas e inundações.

Em consequência disso, e aliada à supressão da vegetação nativa e às ações antrópicas, as zonas costeiras tornaram-se áreas extremamente vulneráveis às mudanças climáticas e a intensificação dos eventos extremos. Dentre esses fenômenos destaca-se, a elevação do nível do mar, que representa uma das principais ameaças para a população que vive em áreas costeiras. De acordo com a National Oceanic and Atmospheric Administration, até 2050 o avanço do mar e tempestades extremas poderão colocar em risco casas e comunidades costeiras, aumentando a frequência e a gravidade das inundações, mesmo em dias sem chuva (NOAA, 2023).

Conforme os dados da Organização das Nações Unidas, o Brasil registrou cerca de 10 eventos climáticos extremos no ano de 2024. Destaca-se o caso das chuvas intensas do estado do Rio Grande do Sul, que provocaram enchentes e inundações sem precedentes, as quais afetaram cerca de 90% do estado, elevando os níveis dos rios e lagoas. Esse evento atingiu cerca de 2,3 milhões de pessoas, superando sua marca histórica que ocorreu no ano de 1941. Segundo o climatologista Francisco Aquino da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), este evento está diretamente ligado às mudanças climáticas, sendo assim um sinal evidente da crise do clima global. Além disso, fatores como a ocupação irregular do solo em áreas de várzeas, desmatamento de nascentes, bem como a infraestrutura urbana inadequada intensificaram os impactos das enchentes. Esse contexto evidencia a intensificação dos eventos extremos no Brasil, principalmente em áreas vulneráveis, como várzeas e zonas costeiras.

Diante desse cenário, destaca-se a cidade do Recife, capital do Estado de Pernambuco, conhecida como “A Veneza Brasileira” por ser cortada por rios como o Capibaribe e Beberibe, possuir diversas pontes e canais e estar localizada próximo ao litoral, sendo constituída por um ecossistema de manguezais, Mata Atlântica e restingas. Apesar de sua localização favorecer

o turismo e o comércio, por estar situada em zona costeira, a região torna-se altamente sensível aos eventos climáticos extremos, à erosão costeira e ao aumento do nível do mar. Como consequência, os impactos podem ser percebidos diretamente sobre o espaço urbano e a população, como a redução da faixa de areia nas praias, alagamentos recorrentes e inundações em dias de chuvas, entre outros transtornos.

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC), Recife é a 16ª cidade mais vulnerável aos efeitos da mudança do clima, e a elevação do nível do mar. Esse cenário tende a intensificar os problemas urbanos e impactar diretamente as zonas costeiras. Ademais, ressalta-se que essa vulnerabilidade não é restringida apenas a ao município, estendendo-se a toda Região Metropolitana do Recife.

Nesse contexto, evidencia-se que os processos urbanos e costeiros estão ligados de modo que as alterações no âmbito costeiro impactam diretamente a dinâmica das cidades litorâneas, ao mesmo tempo em que as alterações antrópicas no meio intensificam esses efeitos.

Dessa forma, observa-se a necessidade da adoção de soluções de infraestrutura mais sustentáveis voltadas à mitigação dos impactos nas zonas costeiras. Nesse contexto, a Prefeitura do Recife vem desenvolvendo alternativas de mitigação e adaptação para tornar a cidade mais resiliente diante desses desafios. Nesse sentido, soluções baseadas na infraestrutura azul surgem como uma estratégia relevante para a mitigação e prevenção desses impactos, além de trazer vantagem para o meio ambiental, social e econômico, como por exemplo, resiliência climática, melhoria na gestão de inundações, áreas de lazer, conservação e aumento da biodiversidade.

Sendo assim, torna-se relevante avaliar as alternativas propostas pela prefeitura do Recife, tanto no âmbito da infraestrutura azul quanto das obras de infraestrutura urbana, para mitigação dos impactos dos eventos climáticos extremos na cidade e em sua zona costeira, a fim de torná- la uma capital mais resiliente às mudanças do clima. Assim, o presente trabalho tem como objetivo analisar as ações de contenção como infraestrutura azul implantada na Cidade do Recife para a mitigação dos impactos de eventos climáticos extremos e proteção da cidade.

Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi realizada uma pesquisa de caráter bibliográfico e documental, com uma abordagem qualitativa. Foram utilizados artigos científicos, relatórios e dados institucionais, como também publicações de órgãos nacionais e internacionais, a fim de analisar a situação atual da cidade do Recife diante dos desafios ocasionados pelos eventos extremos e mudanças climáticas, bem como os impactos sobre o ambiente costeiro e a posição da Prefeitura do Recife com a responsabilidade de tornar a cidade mais resiliente frente a esses desafios.

Com essa finalidade foram realizadas buscas em sites institucionais, como o Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, Organização das Nações Unidas (ONU), IBGE, além de artigos científicos obtidos por meio da plataforma Periódico Capes e revistas científicas online.

Resultados e Discussão

Segundo o Art. 3 do Decreto N° 5.300/2004 a zona costeira é definida como um espaço geográfico de interação do ar, do mar e da terra, incluindo seus recursos renováveis ou não, abrangendo uma faixa marítima e uma faixa terrestre (BRASIL, 2004). Atualmente essas regiões permanecem como áreas de grande interesse da população. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, fatores como a expansão urbana desordenada, bem como o interesse recreativo e ambiental, tornam esses locais altamente atrativos para ocupação humana. No entanto, essas zonas apresentam áreas sensíveis como os manguezais, vegetação nativa e costões rochosos, que são de grande importância para o ecossistema, como também representam uma barreira natural que previne e impede fenômenos como a erosão costeira, intrusão salina e protegem a costa contra tempestades.

A cidade do Recife, marcada por suas belas paisagens e praias, foi construída e ocupada próxima a áreas costeiras e alagadiças. Com sua topografia baixa e plana, a cidade torna-se cada vez mais vulnerável às alterações climáticas. O aumento da ocorrência desses eventos climáticos tem causado impactos significativos nas áreas urbanas e em zonas costeiras. Nesse contexto, observa-se o agravamento das ocorrências dos alagamentos, especialmente em situações em que os índices pluviométricos ultrapassam a média esperada para o período em curtos intervalos de tempo, sobrecarregando os sistemas de drenagem urbana. Esse cenário torna-se ainda mais crítico quando coincide com os períodos de maré alta, dificultando o escoamento das águas pluviais e potencializando os alagamentos.

Essa situação foi evidenciada durante o evento extremo ocorrido no ano de 2022, em Pernambuco, quando fortes chuvas atingiram o estado provocando inundações, alagamentos e deslizamentos de terra. De acordo com o climatologista do Cemaden, José Marengo, o aquecimento global tornou as chuvas cerca de 20% mais intensas do que seriam em um clima mais frio. As chuvas atingiram principalmente o Recife e a Região Metropolitana e afetou cerca de 130 mil pessoas. Estudos do Cemaden apontaram que, para reduzir os impactos adversos dos desastres relacionados ao clima, são necessários serviços climáticos, sistemas completos de alerta e investimentos sustentáveis.

Além dos fatores climáticos, a vulnerabilidade costeira está diretamente ligada às intervenções antrópicas no meio ao longo dos anos. A ocupação intensa e desordenada nas áreas costeiras acarretou a retirada da vegetação presente na costa, como os manguezais e restingas, que possuem papel fundamental na proteção contra a erosão, ressaca e eventos climáticos. Em decorrência disso, pode-se observar ao longo dos anos o avanço do mar e suas consequências no ambiente praial, em especial a erosão costeira que ocasiona a perda de sedimentos, provocando a diminuição da faixa de areia e o comprometimento da infraestrutura urbana. Segundo a Secretária de Meio Ambiente, Sustentabilidade e de Fernando de Noronha de Pernambuco, o avanço do mar já atinge

cerca de 30% das praias do estado. Especialistas apontam que, em breve, será necessário realizar o processo de engordamento da faixa de areia na praia de Boa Viagem, como já foi feito anteriormente em Jaboatão, no ano de 2013.

Na cidade do Recife, já é possível identificar iniciativas voltadas à infraestrutura azul e urbana, como a criação de parques lineares, jardins filtrantes e reservatórios para conter os alagamentos, como também intervenções costeiras para a ampliação da faixa de areia, com o objetivo de conter os processos erosivos.

Diante dos desafios apresentados, a gestão pública da cidade do Recife tem buscado adotar estratégias que articulem soluções estruturais tradicionais com abordagens baseadas na natureza. Nesse contexto, a infraestrutura azul passa a desempenhar um papel central ao propor intervenções que dialogam com a dinâmica hídrica e ecológica do território. Diferentemente das soluções exclusivamente baseadas em engenharia convencional, essas iniciativas procuram incorporar processos naturais ao planejamento urbano, contribuindo para a mitigação de riscos, qualificação ambiental e paisagística da cidade.

Essa mudança de abordagem revela uma tentativa de superar respostas reativas aos eventos extremos, avançando para uma lógica mais preventiva e adaptativa. Ao integrar dispositivos que favorecem a infiltração, retenção e desaceleração das águas pluviais, a infraestrutura azul amplia a capacidade de resposta do sistema urbano frente às chuvas intensas e à elevação do nível do mar, ainda que seus resultados dependam de implementação contínua e articulação com outras políticas urbanas.

Entre as iniciativas já implantadas, destacam-se os jardins filtrantes do Parque do Caiara, que exemplificam a aplicação prática da infraestrutura azul no contexto urbano. (Figura 01).



Figura 01: Jardins filtrantes no parque do Caiara, Recife.
Fonte: Giselle Cahú Aries/CITinova (2023)

Estes dispositivos atuam como áreas de retenção e tratamento das águas pluviais, promovendo a filtragem de poluentes e reduzindo o volume de escoamento superficial direcionado ao sistema de drenagem. Ao favorecer a infiltração no solo, os jardins contribuem para aliviar a sobrecarga das galerias durante eventos de chuva intensa, promovem benefícios ambientais associados à melhoria da qualidade da água e à criação de micro-habitats urbanos.

Paralelamente, a implantação de reservatórios de contenção tem se mostrado uma estratégia complementar no enfrentamento dos alagamentos. Esses equipamentos funcionam como estruturas de armazenamento temporário, retardando o escoamento das águas e reduzindo picos de inundação em áreas críticas. Entretanto, embora eficazes em determinados contextos, tais soluções exigem manutenção contínua e planejamento integrado, sob o risco de se tornarem insuficientes frente à intensificação dos eventos extremos.

Outra frente relevante diz respeito à criação e ampliação de parques lineares, como o Parque Roque Santeiro, que integram funções ecológicas e urbanas. Esses espaços, frequentemente implantados ao longo de cursos d'água, atuam como zonas de amortecimento em períodos de cheia, ao mesmo tempo em que promovem a recuperação ambiental de áreas degradadas. Ao incorporar vegetação nativa e ampliar áreas permeáveis, os parques contribuem para a regulação hídrica e térmica da cidade, ademais oferecerem espaços de lazer e convivência para a população. (Figura 02).

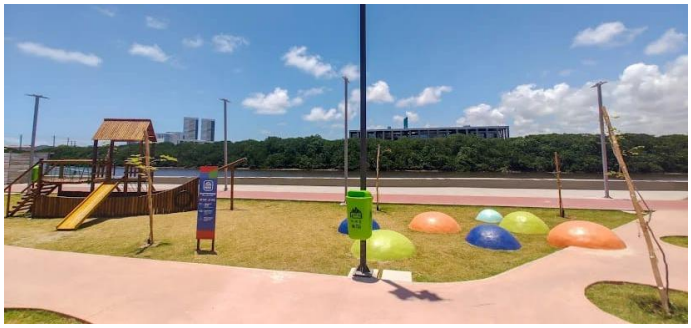


Figura 02: Parque Linear Roque Santeiro, Recife.
Fonte: Raquel Lins (Google Maps, 2026)

Nesse sentido, o programa "Recife Cidade Parque" sinaliza um esforço mais amplo de reconfiguração do espaço urbano, buscando ampliar a presença de áreas verdes e conectá-las de forma estratégica. Ainda que tais iniciativas representam avanços importantes, sua efetividade depende da capacidade de articulação territorial e da continuidade das políticas públicas, evitando que intervenções pontuais se tornem desconectadas de uma visão sistêmica de planejamento urbano.

No que diz respeito à zona costeira, as intervenções têm sido predominantemente pautadas por soluções de engenharia, como o enrocamento e a engorda da faixa de areia. O enrocamento, caracterizado pela disposição de blocos de rocha ao longo da costa, atua como uma barreira física contra a ação das ondas, reduzindo processos erosivos em trechos mais vulneráveis. Já a engorda da praia consiste na reposição artificial de sedimentos, ampliando a faixa de areia e criando uma zona de dissipação de energia das ondas. (Figura 03).



Figura 03: Enrocamento e avanço do mar, Recife.
Fonte: Crysli Viana (Diário de Pernambuco, 2026)

Embora essas medidas apresentem resultados imediatos na contenção da erosão, elas não estão isentas de limitações. A necessidade de manutenção periódica, os altos custos envolvidos e os possíveis impactos ambientais associados levantam questionamentos sobre sua sustentabilidade a longo prazo. Além disso, ao não abordarem as causas estruturais da erosão costeira, tais intervenções tendem a funcionar como soluções paliativas, especialmente em um cenário de elevação contínua do nível do mar.

Considerações Finais

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar as alternativas de infraestrutura azul e obras urbanas propostas pela gestão da cidade do Recife. A partir da análise realizada, verificou-se que a prefeitura vem implementando tanto soluções baseadas na natureza e infraestrutura azul, como os jardins filtrantes, a criação e ampliação de parques lineares e alagáveis quanto obras de infraestrutura urbana a exemplo da implantação dos reservatórios de drenagem. No que se refere às alternativas para a costa,observou-se que estas se limitam, predominantemente, ao uso de alternativas de engenharia tradicional, como o uso do enrocamento, muros de contenção e possibilidades de engorda da faixa de areia nas áreas de praia.

Sendo assim, ao examinar os esforços em curso, percebe-se que, embora as iniciativas de infraestrutura azul e as ações litorâneas postas em prática em Recife representem avanços notáveis na adequação da cidade às transformações climáticas, sua eficácia ainda se vê limitada por restrições estruturais, institucionais e no âmbito socioespacial.

Além disso, os estudos indicam que soluções como o aumento artificial de praias e a construção de enrocamentos, apesar de eficazes a curto prazo, possuem limitações quanto à viabilidade econômica e ambiental, demandando manutenção constante e não atacando as causas basilares da erosão costeira (NOAA, 2023; IPCC, 2022). Ademais, o processo de engordamento da faixa de areia pode alterar a dinâmica natural da costa, comprometendo as condições de balneabilidade e a segurança para banho em determinadas áreas.

Nesse panorama, torna-se claro que a expansão dessas estratégias deve vir acompanhada de políticas públicas mais amplas, sobretudo aquelas focadas na regulação da ocupação em áreas de risco e na adaptação planejada das populações em situação de vulnerabilidade. Destaca-se, ainda, a necessidade de adoção de medidas que considerem o recuo planejado de estruturas próximas a áreas costeiras mais suscetíveis, aliado a intervenções no continente, com o objetivo de preservar ecossistemas naturais como os manguezais e restingas, fundamentais para o equilíbrio ambiental, enfrentamento das mudanças climáticas e proteção costeira.

Apesar disso, a implementação dessas políticas esbarra em desafios consideráveis, principalmente no que diz respeito à aceitação social, aos custos financeiros e à necessidade de assegurar justiça socioambiental. Dessa forma, embora as soluções atualmente em uso em Recife contribuam para a atenuação dos impactos imediatos, sua consolidação como estratégia a longo prazo depende da ampliação das ações, da integração entre políticas públicas e da inclusão de abordagens que combatam, de maneira estrutural, a vulnerabilidade urbana e costeira.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal Rural de Pernambuco pelo suporte acadêmico e infraestrutura disponibilizada, bem como aos professores pelas contribuições técnicas e científicas que auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho. Expressam, ainda, gratidão a Deus pela força e pelas oportunidades concedidas.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Decreto nº 5.300, de 7 de dezembro de 2004. Regulamenta a Lei nº 7.661, de 16 de maio de 1988, que institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5300.htm. Acesso em: 23 mar. 2026

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. A zona costeira e seus múltiplos usos. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/oceano-e-clima/a-zona-costeira-e-seus-multiplos-usos. Acesso em: 23 mar. 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Ecossistemas costeiros e marinhos. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biomas-e-ecossistemas/ecossistemas-costeiros-e-marinhos. Acesso em: 23 mar. 2026.

CEMADEN. Pesquisadores analisam inundações em Recife após chuvas de 2022. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/cemaden.Acesso em: 01 abr. 2026.

COP30 Brasil. Enchentes no Rio Grande do Sul escancararam a crise do clima. Publicado em: 6 maio 2025. Disponível em: https://cop30.br/pt-br/noticias-da-cop30/enchentes-no-rio-grande-do-sul-escancararam-a-crise-do-clima. Acesso em: 30 mar. 2026.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). Pesquisadores brasileiros fazem recomendações, analisando as repentinas inundações e deslizamentos de terra em Recife (PE), após fortes chuvas ocorridas em maio de 2022. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/pesquisadores-brasileiros-fazem-recomendacoes-analisando-as-repentinas-inundacoes-e-deslizamentos-de-terra-em-recife-pe-apos-fortes-chuvas-ocorridas-em-maio-de-2022. Acesso em: 8 abr. 2026.

IBGE. Censo 2022: população urbana no Brasil. 2024. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br. Acesso em: 27 abr. 2026

MEYER, J. O oceano está subindo: dados revelam elevação recorde do nível do mar nos últimos 30 anos. 2025. INPO – Instituto Nacional de Pesquisas Oceânicas. Disponível em: https://inpo.org.br/o-oceano-esta-subindo-o-que-os-dados-oficiais-revelam-sobre-a-elevacao-do-nivel-do-mar/. Acesso em: 23 mar. 2026.

NOAA. Climate Change: Global Sea Level. 2023. Disponível em: https://www.climate.gov. Acesso em: 29 abr. 2026

ONU NEWS. Brasil teve 10 eventos climáticos extremos em 2024. 2025. Disponível em: https://news.un.org/pt/story/2025/03/1846766. Acesso em: 30 mar. 2026.

OLIVEIRA, R. T. de; SANTOS, F. K. S. dos. O início da formação territorial brasileira: uma reflexão sobre o território em Suape. Revista de Geografia (Recife), v. 31, n. 3, 2014. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/229147/23546. Acesso em: 16 mar. 2026

PEREIRA, A. 87 % da população brasileira vivia em áreas urbanas. IBGE – Educa | Jovens, 28 jan. 2025. Disponível em: https://educa.ibge.gov.br/jovens/materias-especiais/22550-87-da-populacao-brasileira-vivia-em-areas-urbanas.html. Acesso em: 16 mar. 2026.

PISAC. Infraestrutura azul: conceito, importância e benefícios urbanos. 2025. Universidade de Brasília.

UNITED NATIONS. Causes and effects of climate change. 2022. Disponível em: https://www.un.org. Acesso em: 27 abr. 2026

PISAC (Parque de Inovação e Sustentabilidade do Ambiente Construído). Infraestrutura azul: conceito, importância e benefícios urbanos. Brasília: Universidade de Brasília, 10 abr. 2025. Disponível em: https://pisac.unb.br/blog/infraestrutura-azul-conceito-importancia-e-beneficios-urbanos/. Acesso em: 6 abr. 2026

RECIFE (Prefeitura do Recife). Recife é a primeira cidade na América Latina a integrar projeto para criação de seguro contra desastres climáticos. Recife, 16 mar. 2022. Disponível em: https://www2.recife.pe.gov.br/noticias/16/03/2022/recife-e-primeira-cidade-na-america-latina-integrar-projeto-para-criacao-de. Acesso em: 6 abr. 2026

ROTHSTEIN, Thiago Rodrigo. Crescimento urbano: impactos nas cidades costeiras. Revista USE, 14 maio de 2025. Disponível

em: https://revistause.com.br/crescimento-urbano-impactos-nas-cidades-costeiras/. Acesso em: 8 abr. 2026

SIQUEIRA, B.; BRITTO, V. Censo 2022: 87 % da população brasileira vive em áreas urbanas. Agência de Notícias IBGE, 14 nov. 2024. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/41901-censo-2022-87-da-populacao-brasileira-vive-em-areas-urbanas. Acesso em: 16 mar. 2026.

UNITED STATES. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Climate change: global sea level. Disponível em: https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level Acesso em 23 mar. 2026.

UNITED NATIONS. Causes and effects of climate change. 2022. Disponível em: https://www.un.org/pt/climatechange/science/causes-effects-climate-change. Acesso em: 30 mar. 2026.

ESPODOSSOLOS E VULNERABILIDADE AMBIENTAL NA ESTAÇÃO ECOLÓGICA JURÉIA-ITATINS (SP): UMA ANÁLISE PRELIMINAR

1 Mayke Santos de Oliveira, 2 Angela Terumi Fushita, 3 Ana Sueling Alves Diniz, 4 Marcio Yukihiro Kohatsu 5Thainan Tammy Tameirão

1 Universidade Federal do ABC, e-mail: Mayke.oliveira@ufabc.edu.br; 2 Universidade Federal do ABC, e-mail: angela.fushita@ufabc.edu.br; 3 Universidade Federal do ABC, e-mail: littleallanis@hotmail.com; 4 Universidade de São Paulo, e-mail: mykohatsu@usp.com; 5 Universidade Federal do ABC, e-mail: thainantt@outlook.com;

Palavras-chave: Espodossolos; vulnerabilidade ambiental; carbono orgânico.

Resumo

Os Espodossolos costeiros apresentam elevada fragilidade ambiental devido à textura arenosa, acidez acentuada, baixa fertilidade natural e forte dependência da cobertura vegetal. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a vulnerabilidade ambiental associada à ocorrência desses solos na Estação Ecológica Juréia-Itatins, litoral sul do estado de São Paulo. A pesquisa foi realizada na planície costeira da bacia do Rio Una, em Peruíbe (SP), por meio de descrição morfológica de perfil e análises granulométricas, químicas e de carbono orgânico do solo. Os resultados indicaram predomínio da fração areia em todos os horizontes (>92%), confirmando o controle litológico dos depósitos quartzosos. Os valores de pH entre 3,9 e 5,5 evidenciaram ambiente fortemente ácido e baixa disponibilidade de nutrientes. A sequência de horizontes A, AB, E, Bh e Bs confirmou intensa atuação da podzolização, com remoção de matéria orgânica e sesquióxidos dos horizontes superficiais e acúmulo em subsuperfície. Os maiores teores de carbono orgânico ocorreram nos horizontes superficiais e no horizonte Bh, indicando potencial de estocagem e estabilização do carbono. Conclui-se que, embora apresentem elevada fragilidade física e química, os Espodossolos da Juréia-Itatins exercem importante função ecológica como reservatórios de carbono e componentes estratégicos para a resiliência ambiental dos ecossistemas costeiros.

Introdução

As zonas costeiras tropicais constituem ambientes de elevada complexidade ambiental, resultantes da interação entre processos oceânicos, continentais e atmosféricos (Brady; Weil, 2013). No litoral sudeste brasileiro, esses sistemas desenvolvem-se amplamente sobre sedimentos arenosos inconsolidados, marcados por baixa coesão estrutural, alta permeabilidade e intensa mobilidade sedimentar, o que confere elevada suscetibilidade à erosão e à reorganização morfodinâmica da paisagem (Lepsch, 2011). Nesse contexto, os solos exercem papel fundamental na estabilidade ambiental, pois suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas influenciam diretamente a retenção de água, a disponibilidade de nutrientes e o estabelecimento da cobertura vegetal (Brady; Weil, 2013). Entre os principais solos associados às planícies costeiras arenosas destacam-se os Espodossolos, formados sob intensa lixiviação e podzolização, processo que promove a remoção de matéria orgânica, ferro e alumínio dos horizontes superficiais e seu acúmulo em subsuperfície, originando horizontes espódicos diagnósticos (Embrapa, 2018; Lundström; Van Breemen; Bain, 2000). Os Espodossolos caracterizam-se, em geral, por textura arenosa, elevada acidez, baixa fertilidade natural, reduzida capacidade de retenção hídrica e forte dependência da cobertura vegetal para manutenção de sua estabilidade superficial (Lepsch, 2011; Embrapa, 2018). Tais fatores tornam esses solos particularmente frágeis frente a alterações hidrológicas, supressão vegetal, processos erosivos e eventos climáticos extremos (Brady; Weil, 2013).

A Estação Ecológica Juréia-Itatins representa uma das áreas mais preservadas da Mata Atlântica costeira brasileira, reunindo ecossistemas de restinga, manguezais e planícies quaternárias (Fundação Florestal 2021). Apesar de seu elevado grau de conservação, a região apresenta significativa vulnerabilidade ambiental em razão da intensa dinâmica costeira associada à ocorrência de Espodossolos e outros solos arenosos pouco desenvolvidos (Lepsch, 2011; Embrapa, 2018). Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo analisar a dinâmica costeira e a vulnerabilidade ambiental na Estação Ecológica Juréia-Itatins (SP), com ênfase na ocorrência dos Espodossolos e na influência de seus atributos físicos e químicos sobre a estabilidade e a resiliência dos sistemas costeiros.

Materiais e Métodos

A área de estudo compreende a Estação Ecológica Juréia-Itatins, localizada no litoral sul do estado de São Paulo, com ênfase nos setores de planície costeira associados à bacia hidrográfica do Rio Una, no município de Peruíbe. A região foi selecionada por apresentar elevada dinâmica sedimentar, ambientes preservados de restinga e ocorrência expressiva de solos arenosos, especialmente Espodossolos, representativos de sistemas costeiros tropicais frágeis.

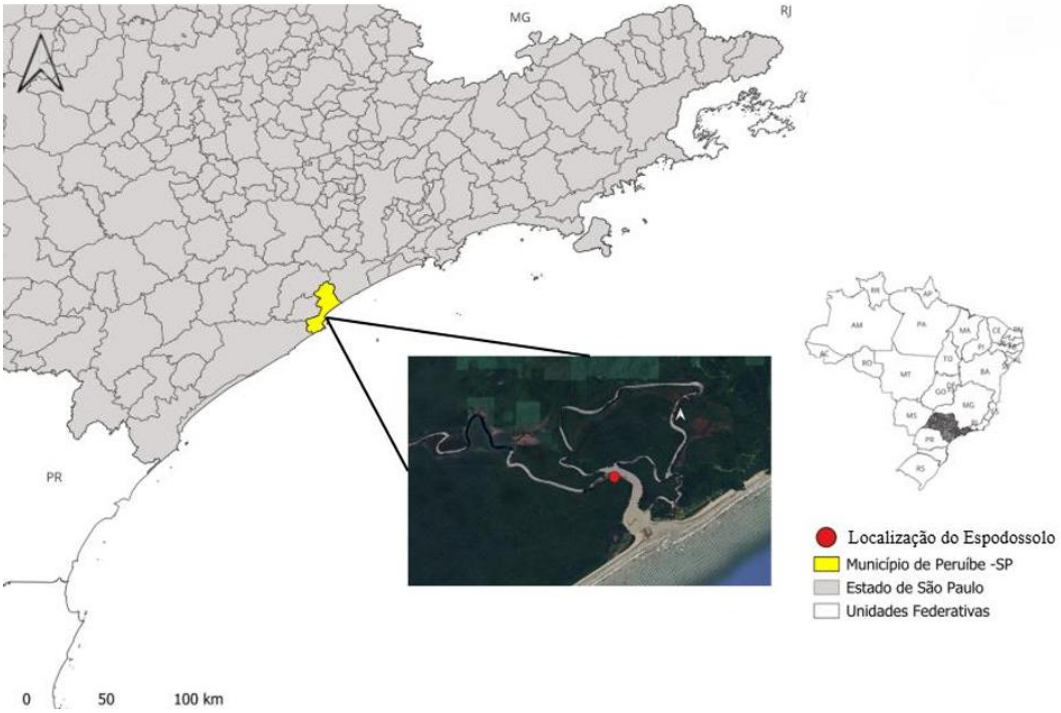


Figura 1: Mapa de Localização
Fonte: Elaboração própria

Foi realizada uma descrição detalhada da paisagem nos locais de abertura dos perfis, considerando aspectos geomorfológicos, hidrológicos e de organização espacial dos terraços fluviais, de modo a subsidiar a análise das relações solo–paisagem. Os diferentes conjuntos de informações foram interpretados de maneira conjunta, com ênfase na identificação de padrões e conexões entre atributos dos solos, compartimentos do relevo e processos pedogenéticos e deposicionais atuantes nos fundos de vale.

A abertura dos perfis foi realizada manualmente, com exposição completa da sequência dos horizontes. A descrição morfológica em campo seguiu os procedimentos estabelecidos por Santos et al. (2017), contemplando a identificação e delimitação dos horizontes, profundidade, cor (sistema Munsell), estrutura, consistência e textura. Também foram registradas a presença de raízes, feições redoximórficas e estratificação sedimentar. A coleta das amostras foi efetuada por horizonte, após limpeza das faces do perfil, sendo armazenados em sacos plásticos devidamente identificados.As amostras foram secas e tamisadas para a produção da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), também segundo indicações de Santos et al. (2015).

Para a análise granulométrica, serão utilizadas alíquotas de 25 g de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), pesadas em balança analítica. As amostras serão acondicionadas em frascos de vidro, aos quais será adicionada solução dispersante de hidróxido de sódio (NaOH) a 0,1 mol L^{-1}, juntamente com 100 mL de água deionizada, conforme os procedimentos descritos por (Vettori, 1969; Embrapa, 2017). Em seguida, os frascos serão submetidos à agitação mecânica lenta em agitador orbital tipo Wagner, por um período de 16 horas. Após a etapa de dispersão, a fração areia será separada por peneiramento úmido em peneira de malha 0,053 mm, mediante lavagem com água, sendo o material retido seco em estufa a 105 °C até massa constante e posteriormente pesado para a determinação da fração areia total. A suspensão remanescente, contendo as frações silte e argila, será transferida para a proveta de sedimentação, com o volume ajustado para 1 L com água deionizada. A suspensão foi homogeneizada por meio de agitação constante em agitador mecânico manual. Após a homogeneização, será coletada, com pipeta volumétrica, uma alíquota de 10 mL para a determinação conjunta das frações silte + argila, a qual será levada à secagem em estufa a 105 °C. Em seguida, a suspensão será mantida em repouso pelo tempo calculado com base na Lei de Stokes, ajustado à temperatura do laboratório, sendo então coletada uma alíquota a 5 cm abaixo da superfície do líquido para a quantificação da fração argila. A fração silte será obtida por diferença, a partir da subtração dos teores de areia total e argila do valor correspondente a 100% (Vettori, 1969; Ruiz, 2005; Embrapa, 1997; Embrapa, 2017).

O pH foi determinado em água e em solução de KCl 1 mol L^{-1}, sendo calculado o ΔpH como indicador da carga superficial do solo. Também foram determinados os teores de alumínio trocável, visando caracterizar a acidez e a baixa fertilidade natural desses solos.

A quantificação do Carbono Orgânico Total (COT) foi realizada em analisador automático de carbono TOC-L (Shimadzu), com combustão seca em alta temperatura com detecção por infravermelho. A densidade do solo (Ds) foi determinada pelo método do anel volumétrico, conforme Embrapa (2017), utilizando amostras indeformadas coletadas nos horizontes diagnósticos e secas em estufa a 105 °C até massa constante.

Os estoques de carbono orgânico do solo foram estimados a partir do teor de COT, da densidade do solo e da espessura de cada horizonte, conforme a equação (1) a baixo:

$$Ec = \frac{C \times Ds \times e}{10}$$

Sendo *Ec* corresponde ao estoque de carbono orgânico do solo (Mg ha^{-1}), *C* ao teor de carbono orgânico (g kg^{-1}), *Ds* à densidade do solo (Mg m^{-3}) e *e* à espessura do horizonte (cm).

Os resultados obtidos foram interpretados de forma integrada, buscando avaliar a fragilidade ambiental dos Espodossolos e a influência de seus atributos físicos, químicos e orgânicos sobre a estabilidade dos ecossistemas costeiros da Juréia-Itatins.

Resultados

O perfil foi classificado como Espodossolo com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SIBICS), sendo descrito e amostrado em superfície levemente elevada da planície costeira da bacia hidrográfica do Rio Una, na Estação Ecológica Juréia-Itatins. A área insere-se em relevo plano, sob vegetação nativa de transição entre restinga e Floresta Ombrófila Densa. A descrição morfológica revela uma sequência de horizontes complexas. O horizonte superficial A (0–15 cm) apresenta coloração bruno-acinzentado escuro (10YR 4/2, seco), textura arenosa, estrutura fraca em pequenos blocos subangulares e grãos simples, consistência não plástica e não pegajosa. Na sequência, o horizonte AB (15–33 cm) apresenta cor bruno-amarelado (10YR 5/4, seco), textura arenosa e estrutura fracamente desenvolvida, com menor quantidade de raízes. O horizonte E (33–65 cm) apresenta coloração bruno muito claro (10YR 7/3, seco), textura arenosa e estrutura em grãos simples, A partir dos 65 cm de profundidade, ocorre o início do horizonte espódico. O horizonte Bh (65–70 cm) apresenta coloração bruno muito escuro (10YR 3/2, seco). Subjacente, o horizonte Bs (70–110 cm) apresenta coloração bruno-amarelado (10YR 5/6, seco). Em profundidade, ocorre o horizonte C (>110 cm), correspondente ao material de origem pouco alterado, de textura arenosa e coloração bruno muito claro acinzentado (10YR 8/3, seco).



(A) Vegetação predominante (B) Espodossolo

Figura 2: Imagem do Pefil – Espodossolo
Fonte: Elaboração própria

Os resultados da análise granulométrica do Perfil revelam o predomínio da fração areia em todos os horizontes analisados, com teores variando entre 92,4% e 98,3%. A fração silte manteve-se reduzida em toda a extensão do perfil, com valores compreendidos entre 0,9% e 3,8%, enquanto a fração argila apresentou variações entre 0,8% e 4,5%. No horizonte superficial A (0–15 cm), o teor de areia total registrado foi de 92,4%, acompanhado por 3,8% de silte e 3,8% de argila. No horizonte de transição AB (15–33 cm), observou-se um incremento na fração areia total para 94,1%, com decréscimo nos teores de silte (3,1%) e argila (2,8%). O horizonte E (33–65 cm) apresentou 97,2% de areia total com redução nas frações finas, sendo 1,5% de silte e 1,3% de argila. Subjacente ao horizonte eluvial, o horizonte Bh (65–70 cm) registrou 94,6% de areia total, com silte a 2,6% e um incremento no teor de argila para 2,8%. No horizonte Bs (70–110 cm), o teor de areia total foi de 93,1%, com 2,4% de silte e argila 4,5%. Já o horizonte C (>110 cm) apresentou a maior proporção de areia total, com 98,3%, 0,9% de silte e 0,8% de argila.

Tabela 1: Composição granulométrica

Horizonte	Profundidade (cm)	Areia Total (%)	Silte (%)	Argila (%)
A	0–15	92,4	3,8	3,8
AB	15–33	94,1	3,1	2,8
E	33–65	97,2	1,5	1,3
Bh	65–70	94,6	2,6	2,8
Bs	70–110	93,1	2,4	4,5
C	> 110	98,3	0,9	0,8

Os valores de pH em KCl ao longo do perfil variaram entre 3,9 e 4,4, indicando baixa amplitude entre os horizontes avaliados.O horizonte A (0–15 cm) apresentou pH 3,9, sendo o menor valor registrado no perfil. No horizonte AB (15–33 cm) foi observado pH 4,3. O horizonte E (33–65 cm) apresentou pH 4,2. Nos horizontes subsuperficiais, o horizonte Bh (65–70 cm) apresentou pH 4,1, enquanto o horizonte Bs (70–110 cm) registrou pH 4,3. No horizonte C (110–130 cm) foi observado pH 4,4.

Tabela 2: Valores de pH em ΔpH

Profundidade	Horizonte	pH (KCL)
0–15	A	3,9
15–33	AB	4,3
33–65	E	4,2
65–70	Bh	4,1
70–110	Bs	4,3
110–130	C	4,4

Os valores de pH em H_2O ao longo do perfil variaram entre 4,4 e 5,5, apresentando variação entre os horizontes analisados. O horizonte A (0–15 cm) apresentou pH 4,4, correspondente ao menor valor registrado no perfil. No horizonte AB (15–33 cm) foi observado pH 4,9. O horizonte E (33–65 cm) apresentou pH 5,2**.** Já o horizonte Bh (65–70 cm) registrou pH 4,9, enquanto o horizonte Bs (70–110 cm) apresentou pH 5,2. No horizonte C (>110 cm) foi observado pH 5,5, correspondente ao maior valor obtido no perfil.

Tabela 3: Valores de pH em água

Profundidade	Horizonte	pH (H_2O)
0–15	A	4,4
15–33	AB	4,9
33–65	E	5,2
65–70	Bh	4,9
70–110	Bs	5,2
>110	C	5,5

Os teores de carbono orgânico total (COT) ao longo do perfil variaram entre 0,017% e 10,58% (Tabela 4). Os maiores valores foram observados nas camadas superficiais do solo. Na profundidade de 0–15 cm, o COT foi 10,17%**,** com densidade do solo (Ds) de 1,3 Mg m^{-3} e estoque de carbono de 19,83 Mg C ha^{-1}**.** Na camada subsequente (15–33 cm), registrou-se o maior valor de COT do perfil (10,58%**),** com densidade de 1,35 Mg m^{-3} e estoque de 25,71 Mg C ha^{-1}**.** Na profundidade de 33–65 cm, o COT diminuiu para 2,82%**,** com densidade de 1,55 Mg m^{-3} e estoque de 13,99 Mg C ha^{-1}**.** Na camada de 65–70 cm, o teor de COT foi 8,69%**,** associado a densidade de 1,45 Mg m^{-3} e estoque de 6,3 Mg C ha^{-1}**.** Na profundidade de 70–110 cm, o COT foi 0,86%**,** com densidade de 1,55 Mg m^{-3} e estoque de 5,33 Mg C ha^{-1}**.** No horizonte mais profundo (>110 cm), registrou-se o menor valor de COT do perfil, 0,017%**,** com densidade de 1,6 Mg m^{-3} e estoque de carbono de 0,11 Mg C ha^{-1}**.**

Tabela 4: Valores de Estoque (Mg C ha^{-1})

Profundidade	COT (%)	Ds (Mg m^{-3})	Estoque (Mg C ha^{-1})
0–15	10,17	1,3	19,83
15–33	10,58	1,35	25,71
33–65	2,82	1,55	13,99
65–70	8,69	1,45	6,3
70–110	0,86	1,55	5,33
>110	0,017	1,6	0,11

Comentários finais

Os resultados obtidos confirmam a ocorrência de um perfil típico de Espodossolo desenvolvido sobre sedimentos quartzosos da planície costeira da Juréia-Itatins, cuja gênese está diretamente relacionada à elevada drenagem, intensa lixiviação e baixa fertilidade natural do material de origem. A predominância da fração areia em todos os horizontes, com valores superiores a 92%, evidencia o forte controle litológico exercido pelos depósitos arenosos quaternários e explica a reduzida capacidade de retenção de água e nutrientes observada nesses solos. Essa condição favorece elevada permeabilidade, intensificando o fluxo vertical de soluções ácidas e os processos de translocação de compostos organometálicos. A organização morfológica do perfil, marcada pela sucessão dos horizontes A, AB, E, Bh e Bs, revela a atuação expressiva da podzolização. O horizonte E, mais claro e empobrecido em frações finas, indica remoção de matéria orgânica, ferro e alumínio dos horizontes superiores, enquanto os horizontes Bh e Bs refletem zonas de iluviação e acúmulo subsuperficial desses constituintes. O aumento relativo do teor de argila no horizonte Bs, em comparação ao horizonte E, reforça a diferenciação pedogenética vertical e a concentração de materiais translocados em profundidade.

Os valores de pH em água e em KCl indicam ambiente fortemente ácido ao longo de todo o perfil, condição característica de Espodossolos sob vegetação de restinga e Floresta Ombrófila Densa. A maior acidez nos horizontes superficiais pode estar associada à decomposição da serrapilheira e à liberação de ácidos orgânicos, que contribuem para a complexação de ferro e alumínio e favorecem sua mobilização no perfil. Em ambientes com pH reduzido, a disponibilidade de bases trocáveis tende a ser limitada, reforçando a baixa fertilidade natural e a elevada fragilidade química desses solos.

Os teores de carbono orgânico total evidenciam importante compartimentalização vertical da matéria orgânica. Os maiores valores registrados nos horizontes superficiais refletem o aporte contínuo de resíduos vegetais e a intensa atividade biológica da cobertura florestal. Entretanto, a elevação do carbono no horizonte Bh demonstra que parte significativa desse material foi translocada e estabilizada em subsuperfície por meio da associação com ferro e alumínio, processo típico da podzolização. Tal mecanismo amplia o tempo de residência do carbono no solo e contribui para a formação de estoques relativamente estáveis. Sob a perspectiva ambiental, os resultados indicam que os Espodossolos da Juréia-Itatins apresentam dupla condição funcional. Por um lado, constituem solos naturalmente frágeis, em razão da textura arenosa, elevada acidez, baixa reserva mineral e forte dependência da cobertura vegetal para manutenção da estabilidade superficial. Por outro, desempenham papel estratégico como reservatórios de carbono orgânico e suporte ecológico para ecossistemas costeiros preservados.

Dessa forma, as intervenções antrópicas como supressão vegetal, alteração da drenagem natural, compactação do solo ou abertura de vias podem desencadear rápida degradação física e perda de carbono armazenado. A conservação da Estação Ecológica Juréia-Itatins mostra-se, portanto, essencial não apenas para a proteção da biodiversidade regional, mas também para a manutenção de funções pedológicas e climáticas relevantes, especialmente relacionadas ao sequestro de carbono e à resiliência ambiental dos ambientes costeiros.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física pelo apoio acadêmico e institucional ao desenvolvimento desta pesquisa. Expressam especial reconhecimento à Professora Angela Terumi Fushita, pela orientação, incentivo científico e valiosas contribuições ao longo da elaboração do trabalho.

Agradecem à Fundação Florestal do Estado de São Paulo pelo apoio institucional, logístico e pela autorização de acesso à área de estudo na Estação Ecológica Juréia-Itatins, viabilizando a realização das atividades de campo.

Agradecem, igualmente, aos membros dos Laboratórios 504 e 502 da Universidade Federal do ABC (UFABC), pelo suporte técnico, estrutura disponibilizada e colaboração nas atividades laboratoriais.

Estendem seus agradecimentos ao Laboratório de Geografia Física do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), Campus Ouro Preto, pelo apoio técnico-científico concedido durante as etapas complementares da pesquisa.

Por fim, registram sincero agradecimento à Professora Caroline Delpulpo, pela disponibilidade, apoio acadêmico e relevantes contribuições científicas ao desenvolvimento deste estudo

Referências Bibliográficas

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

FUNDAÇÃO FLORESTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Estação Ecológica Juréia-Itatins: plano de manejo*. São Paulo: Fundação Florestal, 2021.

LEPSCH, I. F. *19 lições de pedologia*. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LUNDSTRÖM, U. S.; VAN BREEMEN, N.; BAIN, D. The podzolization process: a review. *Geoderma*, Amsterdam, v. 94, p. 91-107, 2000.

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 297-300, 2005.

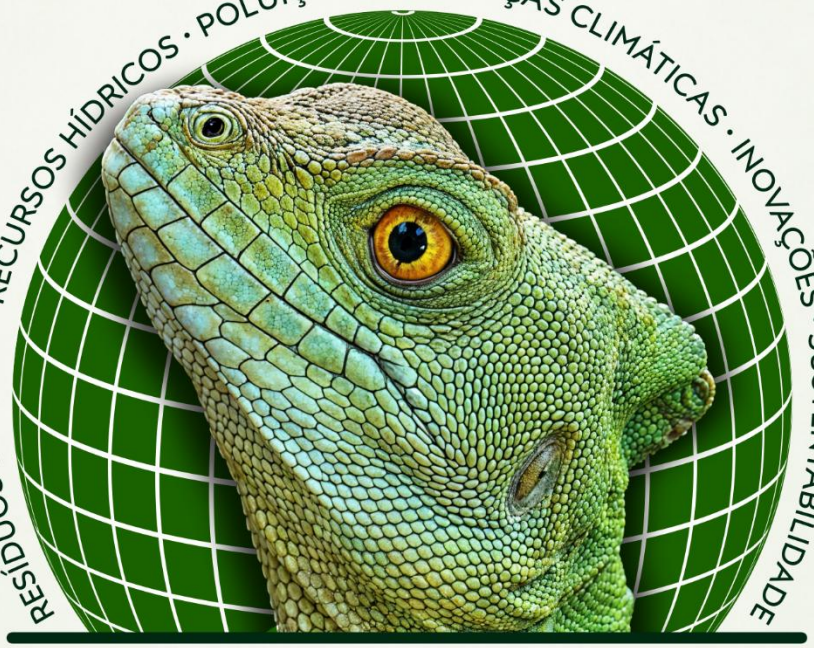
SANTOS, H. G. dos et al. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 7. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

SANTOS, H. G. dos et al. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 8. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2017.

VETTORI, L. *Métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, 1969.

ÁREA TEMÁTICA 14

INFRAESTRUTURA VERDE E CIDADES INTELIGENTES



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

BIOCHAR FROM WOOD WASTE AS A SUBSTRATE CONDITIONER FOR GREEN ROOF: EFFECT ON ELEMENT LEACHING

1 Daniele de Andrade Villarim Lima, 2 Denise Alves Fungaro, 3 Marycel Elena Barboza Cotrim, 4 João Cristiano Ulrich.

1, 2, 3, 4 IPEN-CNEN/SP – Institute of Energy and Nuclear Research, São Paulo. E-mail: 1danivillarim@hotmail.com, 2dfungaro@ipen.br, 3mecotrim@ipen.br, 4jculrich@ipen.br.

Keywords: simulated acid rain; urban green infrastructure; environmental sustainability.

Abstract

The use of biochar as an amendment in green roof substrates has been widely investigated due to its potential to reduce environmental impacts associated with urban runoff. This study evaluated the effect of wood waste-derived biochar applied at proportions of 3%, 5%, 14%, and 21% on the concentration of elements (Ca, K, Mg, P, B, Fe, Ni, Al, and Pb) in leachate. The experiment was conducted under controlled conditions using pot-based experimental units containing substrate with and without peanut grass (*Arachis repens*) under simulated acid rain. A reduction in the leachate concentrations of all macronutrients was observed in the biochar-amended samples, especially at 5% and 14% compared to the control (Ca: 71.0%; K: 80.4%; Mg: 82.3%; P: 84.5%), indicating an optimal range of biochar application for mitigating nutrient leaching. Among the evaluated micronutrients, Ni (~94%) and B (~81%) showed marked reductions associated with the presence of vegetation, which were maintained with biochar addition at 3%, 5%, and 14%. Pb also showed substantial reduction, particularly at 5% and 14% (~60–71%), highlighting the adsorptive potential of the conditioner for this potentially toxic element. These results demonstrate the potential of wood waste-derived biochar as a sustainable substrate conditioner for green roofs, in line with circular economy principles and SDGs 3, 6, 11, 12, 13, and 14.

Introduction

Rapid urbanization intensifies soil sealing, overloads drainage systems, and compromises rainwater quality. The predominance of impervious surfaces, such as asphalt and concrete, reduces infiltration and increases surface runoff, a problem that is even more critical in highly verticalized cities where green areas are limited (DIENER; AGOSTINETTO; SIEGLOCK, 2025; TUCCI, 2003).

In this context, green roofs emerge as a nature-based solution capable of retaining, delaying, and improving the quality of surface runoff. Water retention is one of the main attributes of these systems, as it allows for the storage and gradual release of rainwater, reducing peak flows and contributing to the rebalancing of the urban hydrological cycle (FRANCIS *et al*., 2014; FLL, 2018; WERDIN *et al*., 2021). In Brazil, public policies such as green property tax incentives have encouraged their adoption, especially in the South and Southeast regions (LIMA, 2023).

Despite these benefits, conventional substrates may act as diffuse sources of pollutants, releasing nutrients into receiving water bodies, particularly during the initial stages after installation (BUFFAM; BOCCELLI, 2016; LIAO *et al*., 2024). In urban environments, the occurrence of acid rain, with pH values ranging from 4.2 to 5.6, can further enhance the mobility of elements in the substrate, increasing the risk of leaching (ROCHA *et al*., 2003).

Biochar, produced through the pyrolysis of organic residues, has been widely investigated as a substrate conditioner due to its high cation exchange capacity, potential to stabilize pH, and ability to retain nutrients (LEHMANN; JOSEPH, 2015; SHI *et al*., 2023). Recent studies have shown that its application in green roofs can reduce the leaching of phosphorus, organic carbon, and suspended solids, with performance depending on both dosage and feedstock characteristics (LIAO *et al*., 2022; GOLDSCHMIDT; BUFFAM, 2023).

The use of lignocellulosic residues for biochar production is aligned with circular economy principles and contributes to several Sustainable Development Goals (SDGs), including SDG 3 (Good Health and Well-being), SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), SDG 12 (Responsible Consumption and Production), SDG 13 (Climate Action), and SDG 14 (Life Below Water).

Previous studies have demonstrated that incorporating wood waste-derived biochar into substrates cultivated with peanut grass (Arachis repens) promotes pH stabilization near neutrality, reduces electrical conductivity, and maintains water retention capacity without compromising the hydraulic performance of the system (LIMA; FUNGARO, 2025).

Therefore, this study aims to evaluate the influence of wood waste-derived biochar addition on the leaching of macronutrients (Ca, K, Mg, and P), micronutrients (B, Fe, and Ni), and potentially toxic elements (Al and Pb) in green roof substrate systems, contributing to the improvement of environmental quality in urban settings.

Materials and Methods

Materials

All reagents used were of analytical grade, and all solutions were prepared with deionized water. Peanut grass (Arachis repens) was used in the experiments, as it is a species commonly applied in green roof systems due to its adaptation to shallow

substrates and its ability to provide good vegetation cover. The commercial substrate used in this study was developed for application in slabs and green roof systems and is suitable for different types of vegetation. The material was supplied by the company ECRA Urban Sustainability. The biochar was produced from sawdust derived from timber management in the region of Sinop (MT), Brazil. The production process was carried out by slow pyrolysis in a batch reactor at approximately 450 °C, with a residence time of 40 min. The material was produced by the Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa), Sinop/MT unit, and provided for this study by researcher Dr. Fabiana Abreu de Rezende. The physicochemical characterization of the biochar and substrate is described in Lima et al. (2025) and Lima (2023).

Methods

Pot leaching test

The experiment was conducted using 18 PET bottles, arranged into six samples in triplicate (Table 1). The selected biochar proportions represent different levels of incorporation into the substrate. The proportions (3%, 5%, 14%, and 21%) were defined based on previous studies reporting commonly applied ranges in green roof substrates, as well as on prior experimental results obtained by the authors, in which intermediate proportions showed greater efficiency in nutrient retention. The inclusion of the 21% proportion aimed to evaluate possible saturation effects of adsorption sites at higher dosages, allowing the assessment of system behavior under conditions of biochar excess. The samples were irrigated with potable water three times per week for 45 days (January–March 2025) to promote the rooting of peanut grass seedlings. Subsequently, they were subjected to 0.33 L of simulated acid rain (HNO_3 and H_2SO_4, 10^{-5} mol L^{-1} each, pH ≈ 4.5), corresponding to the average annual rainfall of 2022 at the Barueri/SP station (INMET). The collected leachates were analyzed for macronutrients, micronutrients, and elements, and the results are expressed as mean ± standard deviation (n = 3) (ROCHA et al., 2003).

Table 1 – Mass proportions of substrate and biochar in each treatment.

Treatment	Vegetation	Substrate (g)	Biochar (g)
SUB (control)	No	100	0
SUBP	Yes	100	0
SBC3%P	Yes	97	3
SBC5%P	Yes	95	5
SBC14%P	Yes	86	14
SBC21%P	Yes	79	21

Determination of element concentrations in leachate

The concentrations of Ca, K, Mg, P, B, Fe, Ni, Al, and Pb were determined by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) using a Spectro Arcos instrument (axial plasma configuration, CCD detector, ORCA system, and two holographic diffraction gratings). All analyses were performed in triplicate. The data were subjected to analysis of variance (ANOVA) and, when significant ($p < 0.05$), to Tukey's test at the 5% significance level. Nonlinear regression analysis was performed using Origin 2018 software, applying an asymptotic decreasing exponential model. Model fit was evaluated using the adjusted R^2. The graphs include standard error bars (±), and different letters indicate statistically significant differences between samples (Tukey, $p < 0.05$).

Results and Discussion

Determination of macronutrients (Ca, K, Mg and P) in leachate

The mean concentrations of macronutrients in the leachates are presented in Table 2 and Figures 1 and 2. The comparison between SUB and SUBP showed significant reductions of 61.4% (Ca), 64.7% (K), 77.3% (Mg), and 66.1% (P), indicating active nutrient uptake by peanut grass, a leguminous species with a stoloniferous root system and high demand for Ca^{2+}, K^+, Mg^{2+}, and $H_2PO_4^-$ (FRANCIS *et al.*, 2014).

Table 2 – Mean concentrations of macronutrients in leachate as a function of biochar proportion (± standard deviation)

Sample	Ca (mg L^{-1})	K (mg L^{-1})	Mg (mg L^{-1})	P (mg L^{-1})
SUB	15.81 ± 12.92 a	31.58 ± 26.80 a	31.84 ± 34.65 a	12.03 ± 4.66 a
SUBP	6.11 ± 0.28 a	11.16 ± 0.70 a	7.24 ± 0.46 a	4.08 ± 1.03 b
SBC3%P	4.90 ± 0.43 a	7.66 ± 0.36 a	5.94 ± 0.40 a	2.91 ± 0.53 b
SBC5%P	4.09 ± 0.30 a	7.05 ± 1.30 a	5.17 ± 0.52 a	2.32 ± 0.39 b
SBC14%P	4.59 ± 1.69 a	6.20 ± 0.50 a	5.64 ± 1.52 a	1.87 ± 0.22 b
SBC21%P	6.91 ± 2.49 a	14.99 ± 6.03 a	9.88 ± 3.40 a	4.36 ± 1.11 b

[1] Letters refer to Tukey's test ($p < 0.05$) applied to phosphorus (P), which was the only macronutrient showing statistically significant differences in ANOVA results ($p = 0.0005$).

For calcium (Ca) and magnesium (Mg), biochar treatments promoted a progressive reduction trend up to SBC5%P (74.1% for Ca and 83.8% for Mg), although without statistically significant differences according to ANOVA ($p > 0.05$). The high variability of the SUB treatment, due to the heterogeneity of the commercial substrate, limited the statistical sensitivity of

the analysis. Nevertheless, the observed retention trend is supported by well-established mechanisms. The high cation exchange capacity of lignocellulosic biochar favors the retention of Ca^{2+} and Mg^{2+} in carboxylic and phenolic functional groups, which are predominant in materials produced at approximately 450 °C (LEHMANN; JOSEPH, 2015; RODRIGUES *et al*., 2017).

Potassium (K) showed the greatest proportional reduction up to the addition of 14% biochar (80.4%), also without statistical significance according to ANOVA ($p = 0.122$), due to the same high variability observed in the SUB treatment.

Phosphorus (P) was the only macronutrient with statistically significant differences by ANOVA ($p = 0.0005$), differing from all other treatments according to Tukey's test ($p < 0.05$), with the lowest value observed at SBC14%P (84.5% reduction). Phosphate adsorption involves precipitation with surface Ca^{2+} and Mg^{2+} and the formation of Ca–P and Mg–P complexes under near-neutral pH conditions (SHI *et al*., 2023).

The results of the nonlinear regression analysis (Table 3 and Figures 3 and 4) confirmed that the asymptotic decreasing exponential function provided an excellent fit for K (adjusted $R^2 = 0.9944$) and P (adjusted $R^2 = 0.9969$), and a moderate fit for Ca (adjusted $R^2 = 0.6748$) and Mg (adjusted $R^2 = 0.7335$), within the range of 0% to 14% biochar. The SBC21%P treatment was excluded from the regression analysis because it showed behavior divergent from the trend observed in the other proportions, with increased concentrations in the leachate. This behavior suggests saturation of biochar adsorption sites at higher dosages, resulting in reduced retention efficiency and, consequently, increased element mobility. Including this point would compromise the fit of the proposed exponential model, which adequately describes the dose–response relationship up to 14% biochar.

These results complement the analysis of variance. For Ca, K, and Mg, whose reductions were not statistically significant by ANOVA due to the high variability of the SUB treatment, regression analysis revealed a consistent dose–response pattern. This interpretation should be considered with caution, given the lack of statistical significance ($p > 0.05$). Nevertheless, the asymptote of the curve, reached between 5% and 14%, represents the minimum estimated leaching value for the substrate–plant system, indicating a potentially optimal range of biochar application.

Table 3 – Nonlinear regression parameters for macronutrients (asymptotic decreasing exponential function).

Item	Adjusted equation (*)	R^2	R^2 Adjusted
Ca	$y = 4.389 - 1.736 \cdot cx$	0.8916	0.6748
K	$y = 6.222 - 4.926 \cdot cx$	0.9982	0.9944
Mg	$y = 5.445 - 1.808 \cdot cx$	0.9112	0.7335
P	$y = 1.830 - 2.776 \cdot cx$	0.9990	0.9969

(*) $y = a - b \cdot c^{\wedge}x$, where x = biochar proportion (%); y = leachate concentration (mg L^{-1}); a = asymptote (estimated minimum concentration); b = decay amplitude; and c = exponential decay rate, indicating the rate of concentration reduction as a function of biochar proportion.

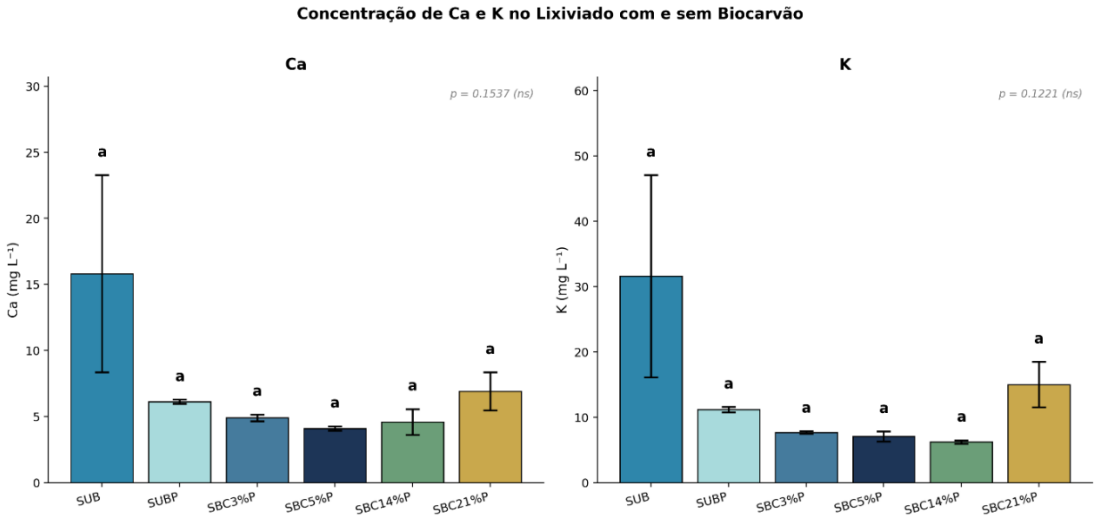


Figure 1 - Concentration of Ca and K in leachate with and without biochar. Error bars represent the standard error (n = 3). Equal letters indicate no significant difference (ANOVA, $p > 0.05$).

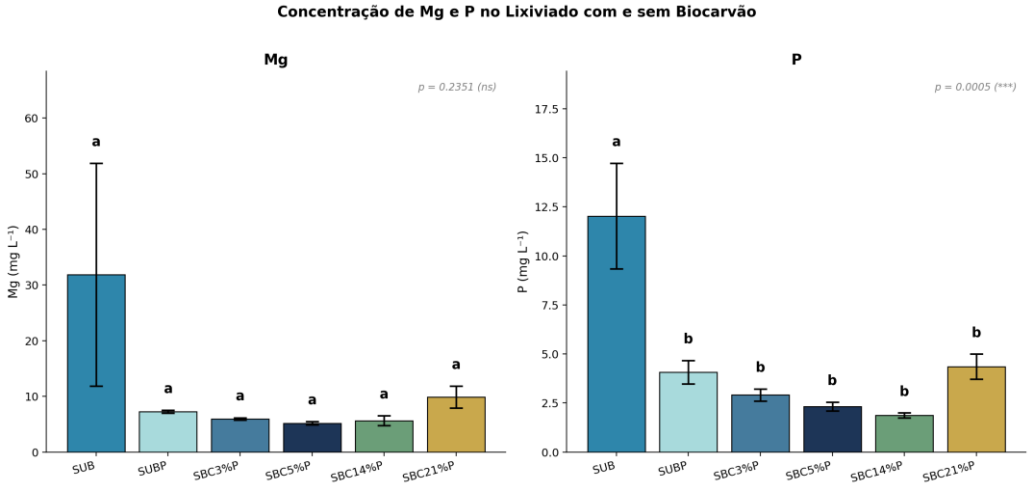


Figure 2 - Concentration of Mg and P in leachate with and without biochar. Error bars represent the standard error (n = 3). Equal letters indicate no significant difference (ANOVA, p > 0.05).

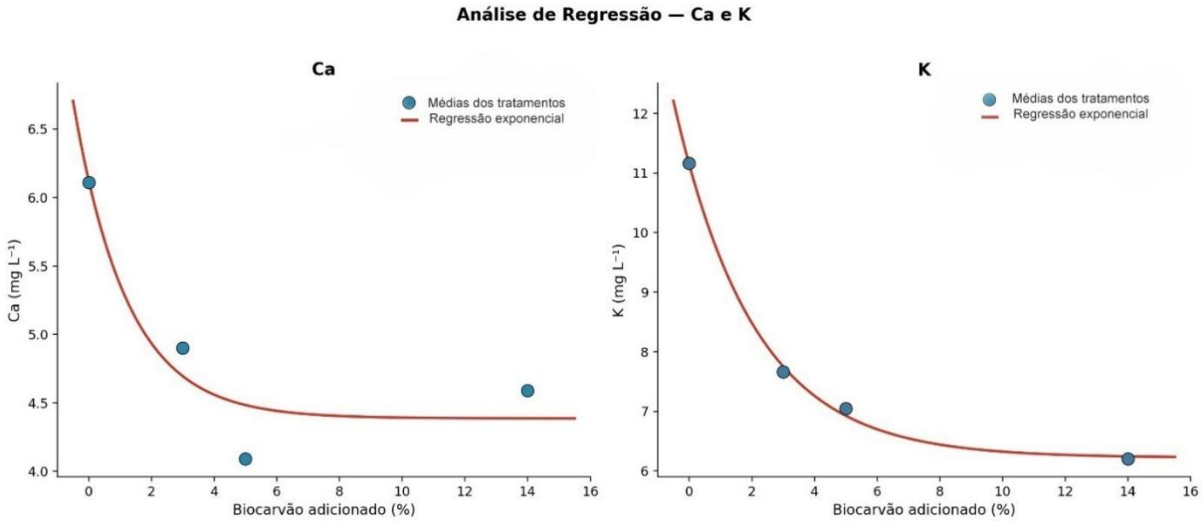


Figure 3 - Nonlinear regression analysis (asymptotic decreasing exponential model) for Ca and K. Points represent the means of the SUBP, SBC3%P, SBC5%P, and SBC14%P treatments (x ∈ [0%, 14%]).

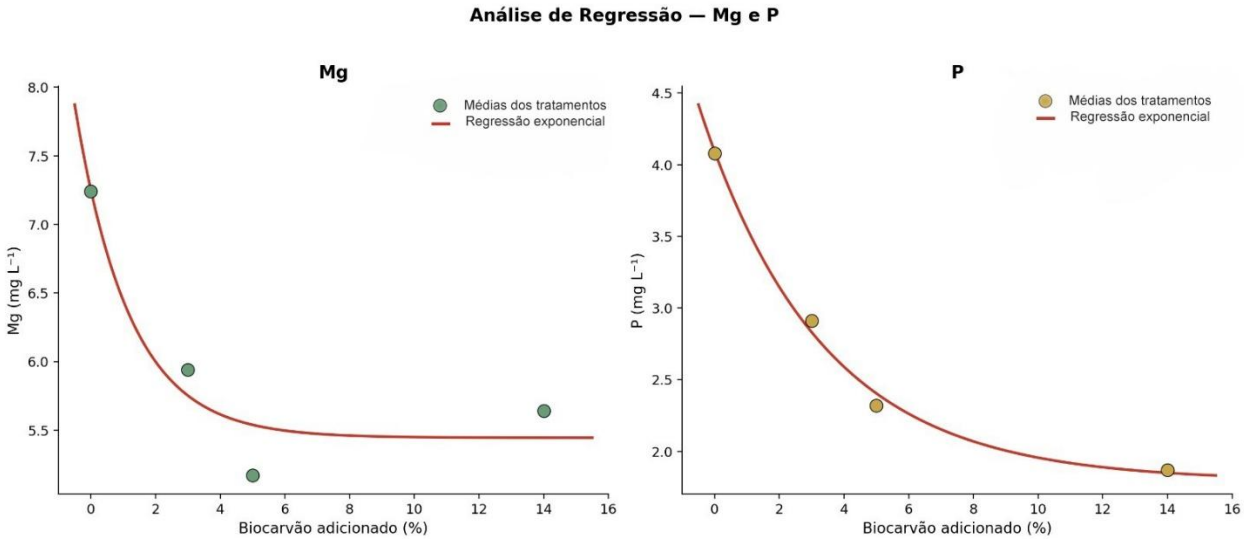


Figure 4 - Nonlinear regression analysis (asymptotic decreasing exponential model) for Mg and P. Points represent the means of the SUBP, SBC3%P, SBC5%P, and SBC14%P treatments (x ∈ [0%, 14%]).

Determination of micronutrients and elements (Al, B, Fe, Ni, and Pb) in leachate

The mean concentrations of micronutrients and elements (Al, B, Fe, Ni, and Pb) in the leachate are presented in Table 4 and Figures 5-7. The addition of biochar and the presence of vegetation influenced the concentrations of each element differently, with variable responses depending on the proportion applied and the physicochemical characteristics of each constituent.

Table 4 – Mean concentrations (± standard deviation) of micronutrients and elements in leachate with and without biochar.

Sample	Al (mg L^{-1})	B (mg L^{-1})	Fe (mg L^{-1})	Ni (mg L^{-1})	Pb (mg L^{-1})
SUB	0.223 ± 0.031 a	0.052 ± 0.039 a	0.078 ± 0.021 b	0.248 ± 0.349 a	0.035 ± 0.013 a
SUBP	0.320 ± 0.056 a	0.010 ± 0.000 a	0.170 ± 0.018 a	0.034 ± 0.002 a	0.033 ± 0.006 a
SBC3%P	0.270 ± 0.036 a	0.010 ± 0.000 a	0.162 ± 0.017 a	0.015 ± 0.008 a	0.025 ± 0.001 a
SBC5%P	0.299 ± 0.044 a	0.010 ± 0.000 a	0.181 ± 0.032 a	0.014 ± 0.007 a	0.014 ± 0.007 b
SBC14%P	0.340 ± 0.079 a	0.010 ± 0.000 a	0.193 ± 0.063 a	0.015 ± 0.009 a	0.010 ± 0.000 b
SBC21%P	0.210 ± 0.053 a	0.034 ± 0.005 a	0.078 ± 0.022 b	0.036 ± 0.034 a	0.020 ± 0.009 a

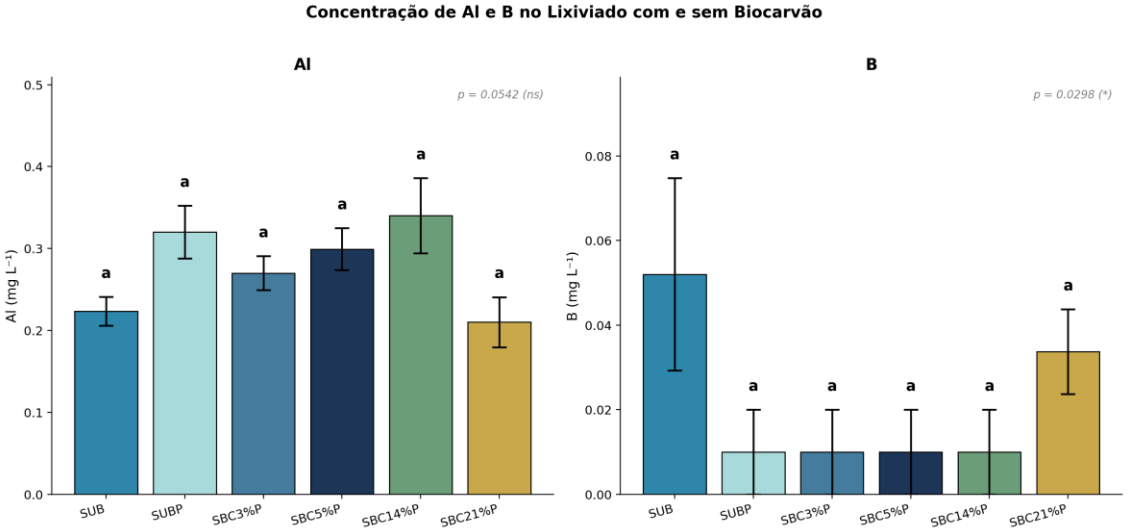


Figure 5 - Concentration of Al and B in leachate with and without biochar. Error bars represent the standard error (n = 3)*. Means followed by different letters indicate significant differences (Tukey, p < 0.05).

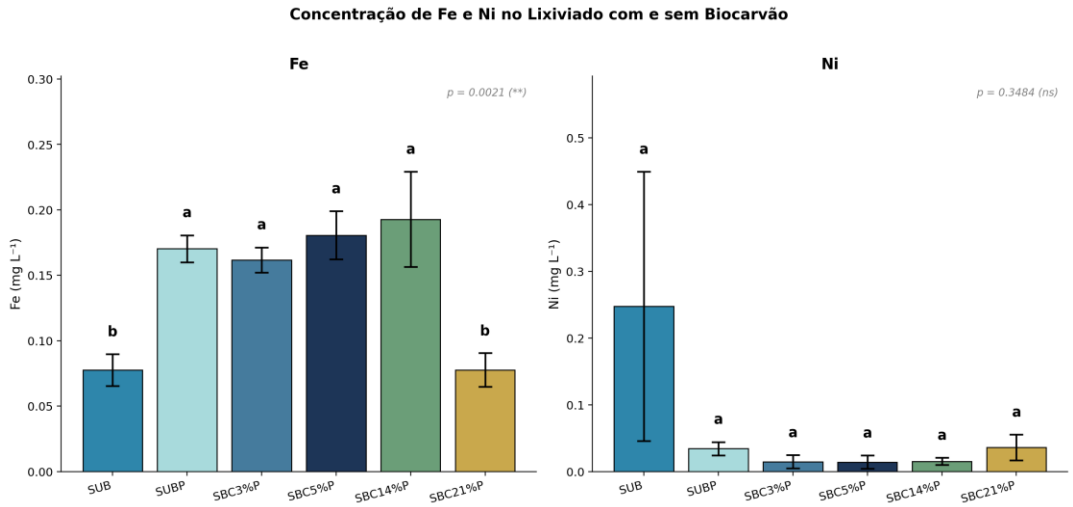


Figure 6 - Concentration of Fe and Ni in leachate with and without biochar. Error bars represent the standard error (n = 3)*. Means followed by different letters indicate significant differences (Tukey, p < 0.05).

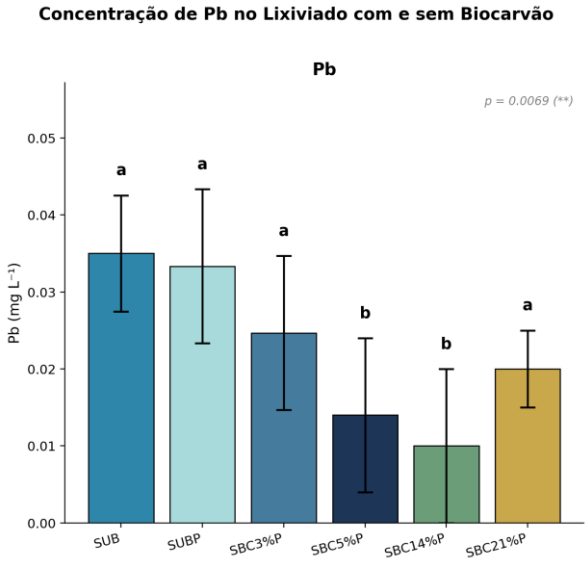


Figure 7 - Concentration of Pb in leachate with and without biochar. Error bars represent the standard error (n = 3)*. Means followed by different letters indicate significant differences (Tukey, $p < 0.05$).

(*) Error bars not visible in some treatments indicate a standard error close to zero (triplicates with values equal to the method detection limit, LD ≈ 0.02 mg L^{-1}). In these cases, the error bar corresponds to LD/2 as an estimate of minimum analytical uncertainty.

Al concentrations in the leachate ranged from 0.210 to 0.340 mg L^{-1} across all treatments, with no reduction pattern associated with biochar addition. The lowest value was observed in SBC21%P (0.210 ± 0.053 mg L^{-1}), while the other treatments showed slightly higher concentrations. This behavior is consistent with the pH conditions of the leachate (6.4–6.8), in which Al^{3+} tends to remain precipitated as low-solubility hydroxides and oxides, limiting its mobilization regardless of the proportion of biochar applied (LEHMANN; JOSEPH, 2015).

The concentration of B in the leachate was significantly reduced in the vegetated treatment (~81%) compared to the non-vegetated substrate (SUB: 0.052 ± 0.039 mg L^{-1}), reflecting high uptake by peanut grass. No changes were observed with increasing biochar proportions, except at 21%, where the concentration increased.

The behavior of Fe differed from that of the other elements. The SUB (0.078 ± 0.021 mg L^{-1}) and SBC21%P (0.078 ± 0.022 mg L^{-1}) treatments showed similar concentrations, both lower than those observed in the intermediate treatments with vegetation and biochar (0.162–0.193 mg L^{-1}), indicating increased Fe mobility associated with biochar addition and root activity. This behavior may be associated with rhizosolubilization, in which root biological activity enhances Fe mobilization in the substrate (RODRIGUES *et al*., 2017).

For Pb, the lowest concentrations were observed in SBC5%P and SBC14%P (0.014 and 0.010 mg L^{-1}, respectively), representing reductions of approximately 60–71% compared to SUB (0.035 mg L^{-1}) and SUBP (0.033 mg L^{-1}). These results suggest that, at these proportions, biochar acts as a Pb^{2+} adsorbent through interactions with surface functional groups. This finding is environmentally relevant, reinforcing the potential of lignocellulosic biochar as an adsorbent for potentially toxic elements.

The concentration of Ni in the leachate was significantly higher in the non-vegetated substrate (SUB: 0.248 ± 0.349 mg L^{-1}) compared to all other treatments. The SBC3%P, SBC5%P, and SBC14%P treatments showed the greatest reductions (~94% compared to SUB), while SBC21%P showed an increase (0.036 mg L^{-1}) relative to the intermediate proportions, indicating possible saturation of adsorption sites at this dosage.

Final considerations

Wood waste-derived biochar added to the substrate significantly reduced the concentrations of macronutrients (Ca, K, Mg, and P) in the leachate at proportions of 5% and 14%, with evidence of adsorption site saturation at 21%. The decreasing exponential function showed an excellent fit for K (adjusted $R^2 = 0.9944$) and P (adjusted $R^2 = 0.9969$), confirming a well-defined dose–response relationship.

The presence of vegetation played an important role in reducing the leaching of B and Ni, highlighting the contribution of plant uptake. The proportions of 5% and 14% biochar were the most efficient in mitigating Ni and Pb concentrations in the leachate, consistent with the behavior observed for macronutrients. Fe and Al generally showed higher concentrations in the biochar-amended treatments, except at 21%, indicating distinct behavior compared to the other evaluated elements. Pb showed a substantial reduction (~60–71%) specifically at 5% and 14%, representing an environmentally relevant result given its toxic potential.

From a circular economy perspective, the use of native wood sawdust transforms an abundant waste material in Brazil into a high-value input for sustainable construction, aligning with SDG 12. The results also demonstrate direct connections with other SDGs: nutrient reduction in leachate contributes to the protection of water bodies (SDGs 6 and 14) and reduces human exposure to diffuse pollutants (SDG 3); carbon sequestration by biochar and mitigation of urban heat islands by green roofs

support SDG 13; and the promotion of resilient green infrastructure reinforces SDG 11. Further full-scale and long-term studies are recommended to confirm these benefits over multiple hydrological cycles.

Acknowledgments

The authors would like to thank Dr. Fabiana Abreu de Rezende for providing the biochar used in this research, and Amir Hernandez for supplying the substrate used in the experiments.

This work was developed within the scope of the Graduate Program in Nuclear Technology – Materials at the Institute of Energy and Nuclear Research (IPEN-CNEN/SP), within the Center for Chemical Engineering and Environment (CEQMA).

This study was carried out with the support of the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel – Brazil (CAPES), Financing Code 001.

Bibliographic References

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E2399/E2399M-15: **Standard test method for maximum media density for dead load analysis of vegetative (green) roof systems**. West Conshohocken: ASTM International, 2015.

BUFFAM, I.; BOCCELLI, D. L. **Assessment of a novel application of biochar to improve runoff water quality from vegetated roofs – Final Report**. Cincinnati: University of Cincinnati, 2016.

DIENER, K. C. Z.; AGOSTINETTO, L.; SIEGLOCK, A. E. Interação entre densificação urbana, impermeabilização, mudança de solo e risco de inundações. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 16, n. 6, e4953, 2025. DOI: 10.7769/gesec.v16i6.4953.

FLL. **Guidelines for the planning, construction and maintenance of green roofing: green roofing guideline**, Ed. 6. Bonn: FLL, 2018.

FRANCIS, J. *et al*. **Growing green guide**. Victoria: Department of Environment and Primary Industries, 2014.

GAO, S.; DELUCA, T. H.; CLEVELAND, C. C. Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: A meta-analysis. **Science of the Total Environment**, v. 654, p. 463–472, 2019.

GOLDSCHMIDT, M.; BUFFAM, I. Biochar-amended substrate improves nutrient retention in green roof plots. **Nature-Based Solutions**, v. 3, p. 100066, 2023.

HUANG, L.; GU, M. Effects of biochar on container substrate properties and growth of plants – A Review. **Horticulturae**, v. 5, n. 1, p. 14, 2019.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. New York: Routledge, 2015.

LIAO, W. *et al*. Biochar granulation, particle size, and vegetation effects on leachate water quality from a green roof substrate. **Science of the Total Environment**, v. 813, p. 152638, 2022.

LIAO, W. *et al*. Biochar and vegetation effects on discharge water quality from organic-substrate green roofs. **Science of the Total Environment**, v. 922, p. 171302, 2024.

LIMA, D. A. V. **Caracterização de substrato e de biocarvão derivado de resíduo madeireiro**. 2023. Dissertação (Mestrado) – IPEN-CNEN/SP, São Paulo, 2023.

LIMA, D. A. V. et al. Effect of wood sawdust-derived biochar as a substrate component on leachate water quality. **International Journal of Sustainable Energy and Environmental Research**, v. 14, n. 1, p. 1–17, 2025. DOI: 10.18488/13.v14i1.4118.

LIMA, D. A. V.; FUNGARO, D. A. **Efeito da adição de biocarvão na retenção de nutrientes e propriedades químicas de substratos para telhados verdes**. In: 22º CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE DE POÇOS DE CALDAS, 2025, Poços de Caldas. Anais [...]. Poços de Caldas: GSC Eventos, 2025.

OLIVEIRA, L. E. Z. *et al*. Biochar as potassium fertilizer alternative: soil and plant response. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 49, e56276, 2019.

ROCHA, F. R. *et al*. Wet deposition and related atmospheric chemistry in the Sao Paulo Metropolis, Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 37, p. 105–115, 2003.

RODRIGUES, M. *et al*. Biochars and nutrient dynamics in a soil-plant system. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, p. 3609–3621, 2017.

SHI, Y. *et al*. Effect of biochar incorporation on phosphorus supplementation and availability in soil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 23, p. 672–686, 2023.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2003.

WERDIN, J. *et al*. Biochar particle size and amendment rate are more important for water retention and weight of green roof substrates. **Ecological Engineering**, v. 171, p. 106391, 2021.

AVALIAÇÃO DA DINÂMICA HIDROLÓGICA EM UMA MICROBACIA URBANA UTILIZANDO TÉCNICAS LID

1 Leonardo Nascimento de Souza, 2 Cristiano Gabriel Persch, 3 Leonardo Lucas Santos Rondon, 4 Igor Tavares dos Santos, 5 Gilson Passos Junior, 6 Pedro Franceschini Mombach

1 Universidade Federal do Mato Grosso, e-mail: lleonardo.souza16@gmail.com; 2 Universidade Federal do Mato Grosso, e-mail: cristiano.persch@ufmt.br; 3 Universidade Federal do Mato Grosso, e-mail: leonardolucassantosrondon@gmail.com; 4 Universidade Federal do Mato Grosso, e-mail: itsxande2@gmail.com; 5 Universidade Federal do Mato Grosso, e-mail: enggilson.junior@gmail.com; 6 Universidade Federal do Mato Grosso, email: pfmombach@gmail.com

Palavras-chave: modelagem; Swmm; hidrologia urbana; controle escoamento.

Resumo

O rápido crescimento das cidades tem alterado o ciclo hidrológico natural das bacias urbanas. A substituição da vegetação por superfícies impermeáveis reduz a infiltração da água no solo e intensificam o escoamento superficial. Neste contexto, diante da viabilidade e do potencial das técnicas LID na mitigação dos impactos hidrológicos decorrentes da urbanização, este trabalho tem como objetivo avaliar a dinâmica hidrológica dessas técnicas aplicadas a uma microbacia urbana que passou por intensas transformações no uso e ocupação do solo em decorrência da expansão urbana. Para isso, a metodologia baseou-se na modelagem de uma área urbana no software SWMM (Storm Water Management Model), considerando quatro cenários distintos — incluindo telhado verde, pavimento permeável e a combinação de ambos —, os quais foram simulados para chuvas de projeto com tempos de retorno de 2, 5 e 10 anos. A partir das simulações, os resultados obtidos indicaram que o cenário combinado apresentou uma maior eficiência na redução do volume no exutório para o tempo de retorno de 2 anos (redução de 33,50% de volume escoado comparado ao cenário base). Além disso, verificou-se reduções da vazão de pico entre 22% e 25% na sub-bacia (loteamento) para as diferentes intensidades de chuva. Ademais, o cenário combinado apresentou o melhor desempenho na redução do coeficiente de *runoff*, com reduções de 31–34% comparado ao cenário base, com valores entre C = 0,41–0,44. Por outro lado, o cenário com pavimento permeável registrou as menores reduções de vazão de pico, coeficiente de *runoff* e redução do volume no exutório. Dessa forma, é importante ressaltar que as técnicas LID não devem ser concebidas como substitutas do sistema de drenagem urbana convencional, mas sim como elementos complementares a ele. Assim, sua integração contribui para uma gestão das águas pluviais mais sustentável, resiliente e alinhada aos princípios da drenagem urbana de baixo impacto.

Introdução

O rápido crescimento das cidades tem transformado profundamente o ciclo hidrológico natural das bacias urbanas. A substituição da vegetação por superfícies impermeáveis reduz a infiltração da água no solo e intensifica o escoamento superficial, sobrecarregando os sistemas de drenagem e provocando frequentes alagamentos (Gonçalves; Nucci, 2017; Tucci, 2007).

No Brasil, a drenagem urbana foi, historicamente, concebida para afastar as águas pluviais do ambiente urbano o mais rapidamente possível — abordagem conhecida como modelo higienista (Christofidis; Assumpção; Kligerman, 2019; Miguez; Rezende; Veról, 2016). No entanto, esse paradigma vem cedendo espaço a soluções mais sustentáveis, voltadas para a retenção e o amortecimento do escoamento superficial diretamente em sua origem (Baptista; Nascimento; Barraud, 2011; Canholi, 2015).

As técnicas LID (*Low Impact Development*), também compreendidas como Soluções baseadas na Natureza (SbN), constituem práticas de desenvolvimento de baixo impacto voltadas ao controle do escoamento pluvial na fonte, em escala local. Essa abordagem se distingue dos métodos tradicionais de drenagem, que geralmente demandam grandes obras de infraestrutura. Além do manejo hídrico, a adoção de técnicas LID oferece uma série de benefícios complementares, como valorização estética, espaços de lazer e melhoria da qualidade da água, podendo ainda ser integradas à infraestrutura dos empreendimentos. Do ponto de vista hidrológico, essas técnicas atuam na redução do coeficiente de escoamento superficial, promovendo o armazenamento e a detenção das águas pluviais e, consequentemente, o amortecimento dos picos de escoamento (Caitana; Ferreira; Campos, 2020; Martin-Mikle *et al.*, 2015; Pellegrino; Alencar, 2017).

Diante da viabilidade e do potencial das técnicas LID na mitigação dos impactos hidrológicos decorrentes da urbanização, este trabalho tem como objetivo avaliar a dinâmica hidrológica dessas técnicas aplicadas a uma microbacia urbana. Para tanto, a pesquisa propõe quantificar e comparar, para diferentes cenários de precipitação e configurações de técnicas LID, a redução do volume escoado, a vazão de pico e o coeficiente de escoamento superficial.

Metodologia

Área de estudo

A área de estudo (Figura 1) compreende aproximadamente 29,7 ha de um condomínio residencial padrão médio/alto localizado na zona leste do município de Cuiabá, Mato Grosso (coordenadas 15°36'07.5" S; 56°01'22.1" W). A escolha dessa área se justifica por dois aspectos complementares. Do ponto de vista do diagnóstico, trata-se de uma região que passou por intensas transformações no uso e ocupação do solo em decorrência da expansão urbana, alterando significativamente as características naturais do terreno e o balanço hídrico local. Do ponto de vista da aplicabilidade, a área apresenta condições

favoráveis à implantação de estruturas LID, tanto pela configuração urbanística do empreendimento quanto pela tipologia das unidades habitacionais, que oferecem superfícies e espaços propícios à integração dessas técnicas.

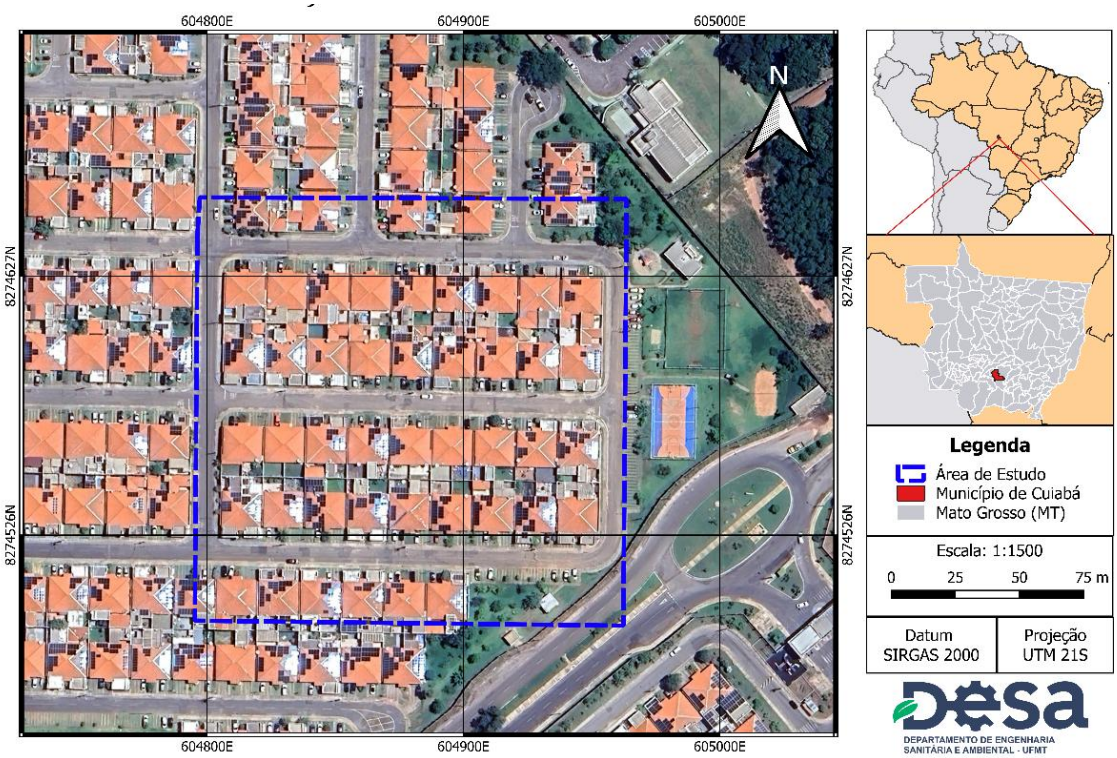


Figura 01: Localização da Área de estudo.
Fonte: Autores (2026).

Implementação da área de estudo no modelo SWMM

Para avaliar a dinâmica hidrológica, a área de estudo foi implementada no software SWMM (*Storm Water Management Model*), que é um modelo hidrodinâmico de chuva-vazão amplamente utilizado principalmente no estudo de áreas urbanas para avaliar a dinâmica do escoamento superficial, permitindo simular tantos eventos isolados quanto séries históricas de precipitação (EPA, 2022). Conforme descrito no manual do SWMM (EPA, 2022), o módulo de chuva-vazão atua em conjunto com as sub-bacias (unidades de resposta hidrológica) que recebem a precipitação e geram o escoamento. Em seguida, é realizado o transporte/propagação por meio de tubulações, canais e dispositivos. Além disso, o SWMM monitora a quantidade de escoamento gerado em cada sub-bacia, bem como o total infiltrado, pico de escoamento, coeficiente de *runoff*, entre outras variáveis.

No modelo, cada sub-bacia foi representada pelos lotes do condomínio, conforme pode ser observado na Figura 2, totalizando 47 sub-bacias, cuja área individual é de 450m² (30m x 15m). Os lotes possuem uma taxa de ocupação de 75% (área impermeável) e 25% de área permeável. Para fins de padronização, adotou-se uma declividade média de 1% para cada lote, baseado na Lei Complementar Nº 389 (2015) que trata do uso e ocupação do solo de Cuiabá.

Para os parâmetros hidráulicos de cada sub-bacia, foram adotados para os coeficientes de rugosidade de Manning em áreas impermeáveis (N-imperv) e áreas permeáveis (N-perv) de 0,013 e 0,025 respectivamente (Porto, 2006). As perdas iniciais em áreas impermeáveis (Dstore-imperv) foram definidas como 2,54mm e em áreas permeáveis (Dstore-perv) de 3,81mm seguindo valores recomendados pelo próprio manual do SWMM (EPA, 2022). O método de infiltração escolhido foi a metodologia da Curva Número (CN) proposto pelo SCS (Chow; Maidment; Mays, 1988). O Grupo hidrológico de solo predominante na região é do tipo B (Sartori; Lombardi Neto; Genovez, 2005) visto que a área é composta por latossolos (Embrapa, 2018). Devido as distintas ocupações em cada lote (sub-bacia) foi adotado uma média ponderada dos valores de CN para a porção impermeabilizada e para a porção permeável. Desta forma, o CN médio estimado foi de 79.

Na elaboração da rede de drenagem foram inseridos nós (que representam os poços de visitas – PV) a cada 60 metros seguindo a recomendação do Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal (ADASA, 2023). As cotas dos poços de visitas foram definidas a partir do perfil de elevação variando de 171,5m à 167,0m. Os PVs foram interligados através de condutos de seção circular e de diâmetro que variam de 500mm a 700mm mantendo a lâmina d'água máxima de 85% (y/D < 0,85) conforme recomendado no Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal (ADASA, 2023). As tubulações são constituídas de concreto armado em bom estado de conservação (coeficiente de rugosidade de Manning adotado de 0,013) (Porto, 2006). Ao longo da macrobacia, os condutos se conectam e direcionam o escoamento para a rede pública (exutório).

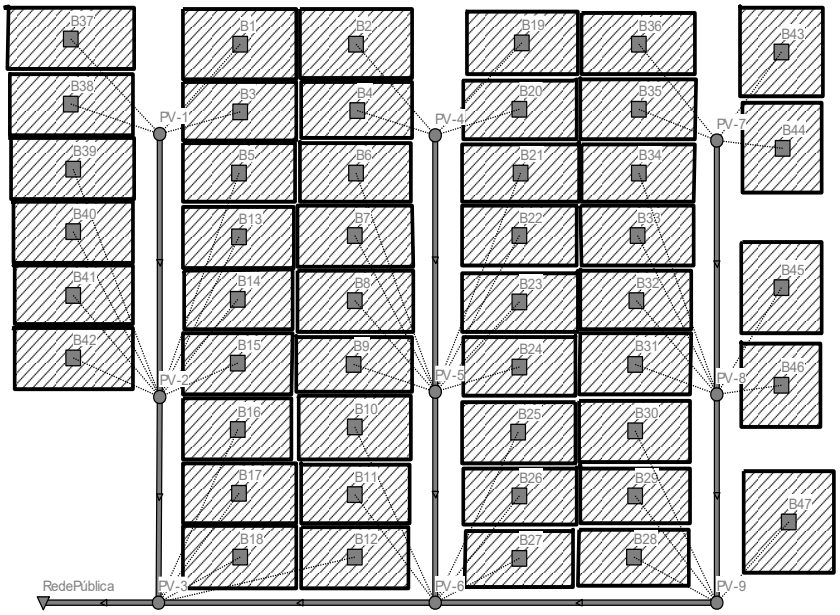


Figura 02: Modelagem no SWMM.
Fonte: Autores (2026).

Para avaliar a dinâmica hidrológica do escoamento no SWMM foram definidos quatro cenários:

- Cenário base: sem técnica LID;
- Cenário TV: uso de técnica LID de armazenamento (telhado verde);
- Cenário PAV: uso de técnica LID de infiltração (pavimento permeável);
- Cenário Combinado: configuração baseada na combinação de armazenamento e infiltração (Telhado Verde + Pavimento Permeável;

No cenário TV e PAV, cada técnica LID ocupou 20% da área total da sub-bacia, por representar a fração das áreas destinadas a calçadas e telhados dentro de um loteamento padrão (Mascaró, 2005). No cenário combinado, a área de ocupação totalizou 40% devido a combinação do telhado verde com o pavimento permeável. As técnicas LID foram adicionadas no conjunto de sub-bacias no SWMM.

Os parâmetros que caracterizam cada técnica foram adotados baseados em valores recomendados pelo manual do SWMM (EPA, 2022) conforme mostrado na Tabela 01 e Tabela 02.

Surface	*Berm Height* (mm)	*Vegetation Volume Fraction*	*Surface Roughness*	*Surface Slope* (%)
	100	0.1	0.13	2
Soil	*Tickness* (mm)	*Porosity*	*Field capacity*	
	150	0.463	0.232	0.116
Drainage Mat	*Tickness* (mm)	*Void Fraction*	*Roughness*	
	50	0.5	0.1	

Tabela 01: Parâmetros do telhado verde no SWMM.
Fonte: Autores (2026).

Surface	*Berm Height* (mm)	*Vegetation Volume Fraction*	*Surface Roughness*	*Surface Slope* (%)
	0	0	0.012	2
Soil	*Tickness* (mm)	*Porosity*	*Field capacity*	*Wilting Point*
	150	0.437	0.062	0.024
Pavement	*Tickness* (mm)	*Void Fraction*	*Permeability* (mm/h)	
	100	0.20	100	
Storage	*Tickness* (mm)	*Void Ratio*	*Seepage rate*	*Clogging Factor*
	300	0.5	10	0
Drain	*Flow Coefficient*	*Flow Exponent*	*Offset Height* (mm)	
	0	0.5	6	

Tabela 02: Parâmetros do pavimento permeável no SWMM.
Fonte: Autores (2026).

Chuva de Projeto

Para a simulação e avaliação da resposta hidrológica frente aos diferentes cenários, foi definida uma chuva sintética baseado na equação de IDF (Equação 1) para Cuiabá (Leão *et al*., 2025).

$$i = \frac{847{,}354 \times TR^{0{,}101}}{(9{,}226 + t)^{0{,}707}} \qquad (01)$$

Onde: I é a intensidade da chuva (mm/h), TR é tempo de retorno (anos) e t duração da chuva (min).

Para a definição do tempo de duração da chuva adotou-se o tempo de concentração (tc) da bacia pela equação de Carter (1961, p. B-11) recomendado para bacias em zonas urbanas. Os valores foram obtidos através de um levantamento virtual utilizando a ferramenta do Google Earth Pro resultando em um comprimento do talvegue (L) de 0,205km e a declividade (S) de 0,0293 m/m gerando um tc de 6,53 minutos. Para a discretização temporal adotou-se um tempo de duração total de 7 minutos e um intervalo de 1 minuto (<1/5tc). O tempo de retorno empregado foi de 2, 5 e 10 anos para os quatros cenários analisados. A metodologia de distribuição temporal empregada foi a dos blocos alternados (Chow; Maidment; Mays, 1988).

Avaliação da Dinâmica do Escoamento

Para a avaliação do desempenho em cada cenário considerando as técnicas LID aplicadas, foram analisados sistematicamente a vazão de pico, o coeficiente de *runoff,* a redução do escoamento superficial e o desempenho individual de cada técnica. A vazão de pico e o coeficiente de *runoff* foram avaliados em escala de sub-bacia (cada lote), enquanto a redução do volume do escoamento superficial foi avaliada em escala macro (exutório da bacia). A vazão de pico é a máxima vazão decorrente da resposta hidrológica da bacia ao evento de precipitação (Chow; Maidment; Mays, 1988) e o coeficiente de *runoff* expressa a relação entre o volume escoado superficialmente e volume total precipitado (Baptista; Nascimento; Barraud, 2011).

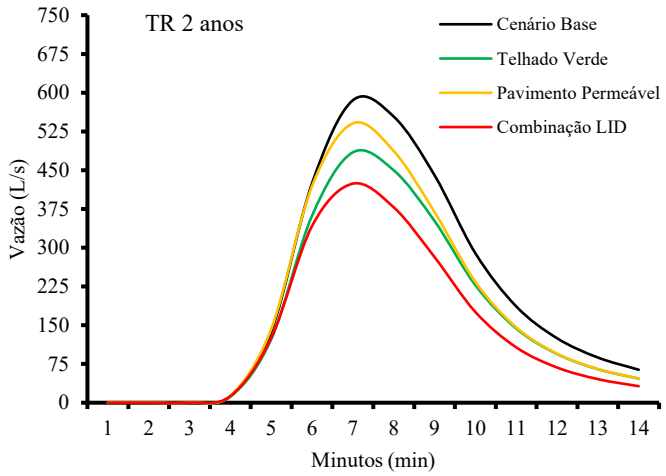
Resultados e Discussão

Avaliação no exutório - escala macro

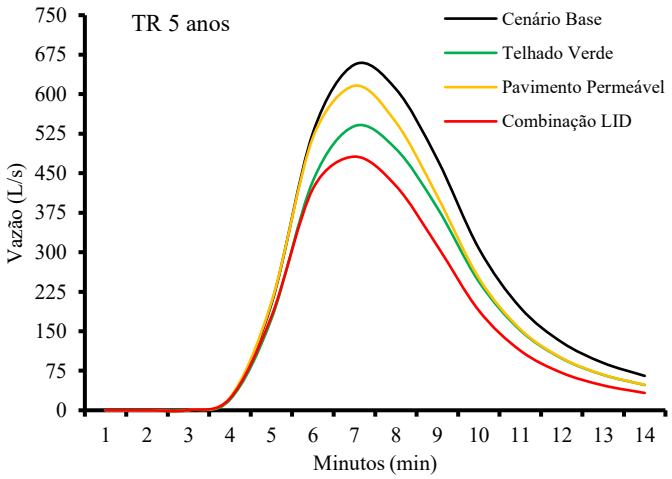
A Figura 3 exibe os hidrogramas de escoamento relacionando as diferentes combinações (cenários) e os respectivos tempos de retorno, sendo (a) TR de 2 anos; (b) TR de 5 anos e (c) TR de 10 anos.

Conforme pode ser observado, a utilização de técnicas LID resultaram no amortecimento da vazão máxima em todos em tempos de retorno (TR 2, 5 e 10 anos), evidenciando sua eficácia no controle da vazão em diferentes cenários. Dentre as técnicas, a combinação de LID apresentou o melhor desempenho na redução da vazão no exutório. Esse resultado demonstra que a junção do armazenamento em telhados verde e a infiltração em pavimentos permeáveis possuem efeito acumulativo e interativo, potencializando os resultados na retenção.

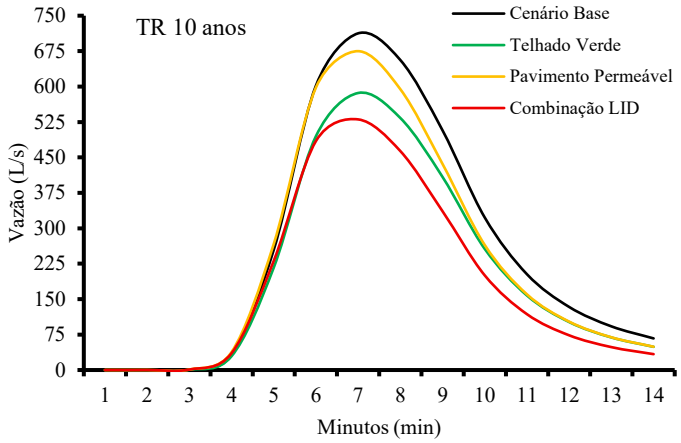
O cenário com pavimento permeável (PAV) apresentou curva de ascensão do hidrograma semelhante à do cenário base, indicando que o modelo não foi sensível à influência dessa medida no início do evento chuvoso. Além disso, o comportamento do PAV mostrou-se uniforme para todos os períodos de retorno analisados, sugerindo maior dependência da duração da chuva do que da sua intensidade.



(a)



(b)



(c)

Figura 03: Hidrograma do escoamento superficial no exutório para (a) TR 2 anos, (b) TR 5 anos e (c) TR 10 anos. Fonte: Autores (2026).

A Tabela 03 exibe à redução do volume total escoado em relação ao cenário base.

Tempo de Retorno	Redução do Volume (%)		
	Telhado Verde	Pavimento Permeável	Combinação LID
2 anos	19,4%	13,1%	33,5%
5 anos	19,5%	12,1%	32,1%
10 anos	19,7%	10,7%	30,9%

Tabela 03: Eficiência na redução do volume no exutório em relação ao cenário base. Fonte: Autores (2026).

O telhado verde demonstrou estabilidade no seu desempenho na redução do volume mantendo percentuais de redução praticamente constantes independentemente do tempo de retorno analisado. Esse comportamento ocorreu porque a capacidade de infiltração e retenção mostrou-se suficiente para amortecer e reter o volume escoado de forma equilibrada em todos os tempos de retorno analisados.

Por outro lado, o pavimento permeável apresentou resultados reduzidos em relação a redução do volume. Isso pode ser explicado pelo fato de que a intensidade nos diferentes tempos de retorno possivelmente foi superior a taxa de infiltração desta camada. Assim, o volume de chuva que não consegue infiltrar, passa a escoar superficialmente.

O cenário combinado apresentou redução progressiva na eficiência de redução de volume à medida que o tempo de retorno aumentou. Destaca-se que, para o tempo de retorno de 2 anos, a eficiência do cenário combinado (~33,5%) superou a soma das eficiências individuais do telhado verde e do pavimento permeável (~32,5%), evidenciando um ganho aproximado de 1% decorrente da integração das duas técnicas.

Avaliação na sub-bacia – escala de lote

A Figura 04 apresenta o percentual de redução da vazão de pico em relação ao cenário base para cada tempo de retorno.

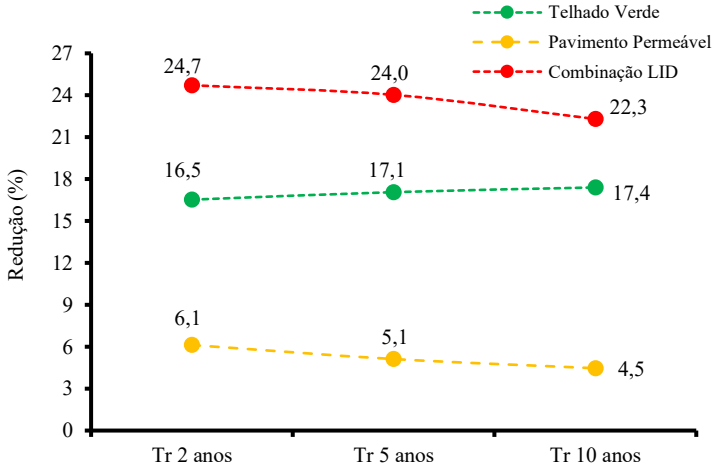


Figura 04: Percentual de redução do escoamento para cada combinação de técnicas LID na vazão de pico nas sub-bacias. Fonte: Autores (2026).

No cenário TV, a eficiência na redução da vazão de pico apresentou tendência crescente conforme o aumento da intensidade da chuva, ou seja, maiores períodos de retorno resultaram em maiores reduções. Esse comportamento já foi relatado na literatura por autores como Baptista, Nascimento e Barroud (2011), que investigaram a influência das características da chuva sobre o desempenho dos telhados verdes. Os percentuais de redução obtidos foram de 16,5%, 17,1% e 17,4%, respectivamente.

O cenário PAV registrou as menores reduções de vazão de pico, com valores entre 4% e 6%. Ao contrário do cenário TV, o desempenho do pavimento permeável decaiu com o aumento da intensidade da chuva, comportamento que pode ser atribuído à limitação da taxa de infiltração do sistema, que se mostra insuficiente para absorver os maiores volumes de escoamento gerados em eventos mais intensos.

O cenário combinado apresentou a maior eficiência entre os cenários analisados, com reduções da vazão de pico entre 22% e 25% (aproximadamente) para as diferentes intensidades de chuva. De forma semelhante ao observado no cenário PAV, eventos de maior intensidade resultaram em queda no desempenho, o que pode ser explicado pela capacidade finita de retenção e infiltração de ambos os sistemas. Em chuvas com TR de 10 anos, as técnicas LID tendem a atingir seu limite operacional, passando a gerar escoamento superficial.

A Tabela 04 apresenta os valores de coeficiente de escoamento para os diferentes cenários simulados.

Tempo de Retorno	Coeficiente de Escoamento (C)			
	Cenário Base	Telhado Verde	Pavimento Permeável	Combinação LID
2 anos	0.62	0.49	0.53	0.41
5 anos	0.63	0.51	0.55	0.43
10 anos	0.64	0.51	0.57	0.44

Tabela 04: Coeficiente de *runoff* para os diferentes cenários.
Fonte: Autores (2026).

Em todos os tempos de retorno analisados, as técnicas de LID reduziram significativamente o coeficiente de escoamento em relação ao Cenário Base, com coeficientes variando entre 0,41 e 0,64. O telhado verde teve uma redução de 20–21%, saindo de C = 0,62–0,64 para C = 0,49–0,51, enquanto o pavimento permeável reduz em torno de 10–14%, com valores entre C = 0,53 e 0,57. Já o cenário combinado (telhado verde + pavimento permeável) apresenta o melhor desempenho, com reduções de 31–34%, atingindo C = 0,41–0,44. Todos os cenários mostram leve elevação do coeficiente de escoamento com o aumento do tempo de retorno, o que é esperado, pois eventos mais raros e intensos saturam o sistema mais rapidamente, reduzindo a eficácia de infiltração.

O telhado verde apresentou valores mais estáveis independentemente da magnitude da chuva. Essa estabilidade está associada ao funcionamento desse LID, que mesmo com intensidades maiores, acaba desempenhando papel no processo de retenção.

A combinação LID é a estratégia mais eficaz para mitigação de picos de escoamento. Para projetos de drenagem que precisam atender a eventos de 2 anos (mais comuns), ela permite trabalhar com C = 0,41 — valor próximo ao de áreas com cobertura vegetal natural —, aliviando substancialmente a carga sobre a infraestrutura de microdrenagem.

Desempenho individual (Técnica LID)

A Tabela 05 exibe a capacidade de retenção inicial e final e o volume transbordado em cada técnica LID empregada.

Tempo de Retorno	Técnica LID	Armazenamento Inicial (m³)	Armazenamento Final (m³)	Volume Transbordado (m³)
2 anos	Telhado Verde	0,8	1,5	-
	Pavimento Permeável	0,2	0,7	0,1
5 anos	Telhado Verde	0,8	1,5	-
	Pavimento Permeável	0,2	0,7	0,2
10 anos	Telhado Verde	0,8	1,6	-
	Pavimento Permeável	0,2	0,7	0,2

Tabela 05: Capacidade de armazenamento e extravasamento das técnicas LID.
Fonte: Autores (2026).

O armazenamento inicial apresentou valores constante para as duas técnicas LID. Essa estabilidade está relacionada ao teor inicial de umidade de cada sistema, antes do início do evento de chuva (Baptista; Nascimento; Barraud, 2011; EPA, 2022;).

Cada telhado verde individualmente apresentou volumes armazenados finais que variam de 1,5 m³ – 1,7 m³. Em todos os tempos de retorno analisados, o sistema não atingiu a sua capacidade máxima de armazenamento indicando que o dimensionamento da técnica foi suficiente para a chuva projeto considerada.

Da forma análoga, em todos os períodos de retorno, o pavimento permeável obteve um armazenamento final constante de 0,7 m³ revelando que a saturação e o limite máximo do sistema foram atingidos. Diante disso, está técnica apresentou volume transbordado que variam de 0,1 m³ - 0,2 m³.

Conclusão

Este trabalho avaliou a dinâmica do escoamento superficial em área urbana mediante a aplicação de técnicas de baixo impacto (LID), com foco na análise comparativa de diferentes cenários de implantação e análise individual de cada técnica. Os resultados obtidos demonstraram que as técnicas LID apresentam desempenho satisfatório na atenuação dos impactos hidrológicos da urbanização, promovendo reduções expressivas no volume escoado, na vazão de pico e no coeficiente de escoamento superficial.

A análise comparativa entre os cenários simulados evidenciou que a combinação de telhados verdes com pavimentos permeáveis — denominada cenário combinado — produziu os melhores resultados hidráulicos, com as maiores reduções observadas nos diferentes tempos de retorno analisados. Embora essa configuração demande investimento inicial mais elevado, em razão da implantação simultânea de duas infraestruturas e da maior complexidade executiva e de manutenção, o desempenho alcançado justifica sua adoção em projetos orientados à eficiência do controle de escoamento.

A análise individual ressaltou que técnicas LID apresentam comportamentos hidrológicos e capacidade de retenção hídrica distintos. Os resultados mostram que o dimensionamento deve ser embasado no mecanismo específico de funcionamento de cada sistema aprimorando o seu desempenho individual.

É importante ressaltar que as técnicas LID não devem ser concebidas como substitutas do sistema de drenagem urbana convencional, mas sim como elementos complementares a ele. A integração dessas abordagens permite o amortecimento dos picos de vazão e a redução dos volumes escoados, aliviando a sobrecarga sobre a rede de macrodrenagem e mitigando os efeitos adversos da impermeabilização do solo. Dessa forma, sua adoção contribui para uma gestão das águas pluviais mais sustentável, resiliente e alinhada aos princípios da drenagem urbana de baixo impacto.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros ampliem a análise para diferentes configurações urbanas, variações climáticas e períodos de retorno extremos, a fim de consolidar as diretrizes de dimensionamento e subsidiar a incorporação dessas técnicas em políticas públicas de planejamento urbano e gestão de recursos hídricos.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), a Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia (FAET) e a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) pelo apoio recebido na realização desse estudo.

Referências Bibliográficas

ADASA. Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas do Distrito Federal**. 2. ed. Brasília, DF: ADASA; UNESCO, 2023.

BAI, Y.; ZHAO, N.; ZHANG, R.; ZENG, X. **Comprehensive Performance Evaluation System Based on Environmental and Economic Benefits for Optimal Allocation of LID Facilities**. Water, v. 11, n. 2, p. 7, 2019.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. 2. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011.

CAITANA, B.; FERREIRA, I.; CAMPOS, P. F. **Co-criação de SbN: envolvendo comunidades e oportunidades de diálogo Europa-Brasil**. Revista de Parcerias Estratégicas, Brasília, v. 25, n. 50, 2020.

CANHOLI, J. J. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

CARTER, R. W. **Magnitude and frequency of floods in suburban areas**: geological survey research 1961. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, 1961. (Professional Paper, 424-B).

CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPÇÃO, R. S. F. V.; KLIGERMAN, D. C. **A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza**. Saúde em Debate, Rio de Janeiro, v. 43, n. esp. 3, p. 94-108, 2019.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988.

CUIABÁ. Lei Complementar nº 389, de 03 de novembro de 2015. **Disciplina o Uso e a Ocupação do Solo no Município de Cuiabá e dá outras providências.** Cuiabá: Câmara Municipal, 2015.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

GONÇALVES, L. M.; NUCCI, J. S. **Gestão de águas pluviais e o controle de inundações**. São Paulo: Editora Acadêmica, 2017.

LEÃO, D. S.; PERSCH, C. G.; PAES, R. P. de; SANTOS, T. Q. B. dos; CARVALHO JUNIOR, W. C. **Chuvas intensas no estado de Mato Grosso**: e-book. 1. ed. Goiânia: Editora Alta Performance, 2025.

MARTIN-MIKLE, C. J.; BEURS, K. M.; JULIAN, J. P.; MAYER, P. M**. Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use watershed**. Landscape and Urban Planning, [s. l.], v. 140, p. 29-41, 2015.

MASCARÓ, Juan Luis. **Loteamentos urbanos**. 2. ed. Porto Alegre: Masquatro Editora, 2005.

MIGUEZ, M. G.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P. **Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

PELLEGRINO, P. R. M.; ALENCAR, J. **Soluções baseadas na natureza para o manejo sustentável das águas pluviais urbanas.** Revista LABVERDE, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 10-35, 2017.

PORTO, R. de M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. **Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 10, n. 4, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, 2007.

U.S. EPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Storm water management model user's manual version 5.2**. Washington, DC: EPA, 2022.

SEGURANÇA HÍDRICA E RESILIÊNCIA CLIMÁTICA NO ALTO IGUAÇU: O MODELO DE INFRAESTRUTURA VERDE DO PARANÁ

1 Msc. Raul Alberto Marcon, 2 Esp. Joao Batista de Lima, 3 Esp. Ester Amélia de Assis Mendes, 4 Msc. Arnaldo Giovani Rech

1 SANEPAR, e-mail: ramarcon@sanepar.com.br; 2 UNILIVRE, e-mail: joao.lima@unilivre.org.br; 3 SANEPAR, e-mail: esteram@sanepar.com.br; 4 SANEPAR, e-mail: arnaldogr@sanepar.com.br

Palavras-chave: Segurança Hídrica, Resiliência Climática, Sustentabilidade.

Resumo

O presente artigo analisa o modelo de infraestrutura verde implementado pela Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), com foco central no Projeto Reservas Hídricas do Iguaçu e sua integração ao Programa de Segurança Hídrica do Paraná (PSH-PR). A pesquisa detalha a transição de um paradigma de engenharia de drenagem convencional para uma abordagem baseada em Soluções baseadas na Natureza (SbN), fundamentada no conceito de "armazenar, depurar e infiltrar". O estudo descreve uma proposta para o desenvolvimento de pesquisas técnico-científicas, estruturadas em cinco atividades fundamentais: quantificação de carbono e bioenzimas; planos de restauração ambiental (PRAD); gestão adaptativa via bioindicadores; planos de ação e salvaguardas socioambientais com a implementação de Sistema de Informação Geográfica (WebSIG). Os resultados esperados indicam que a requalificação de passivos ambientais, como as antigas cavas de mineração em ativos hídricos estratégicos, que devem proporcionar não apenas resiliência climática contra eventos extremos de seca e inundação, mas também possuem potencial de geração de externalidades econômicas positivas através da monetização de serviços ecossistêmicos.

Introdução

A gestão contemporânea de recursos hídricos em territórios sob intensa pressão antropogênica, como a Região Metropolitana de Curitiba (RMC), exige a superação de modelos tradicionais em favor de estratégias integradas que unam segurança jurídica, viabilidade econômica e resiliência climática.

O cenário enfrentado pelo Estado do Paraná entre os anos de 2020 e 2021, caracterizado por um déficit pluviométrico sem precedentes, serviu como o catalisador para a reestruturação profunda das políticas públicas de saneamento e conservação. Este evento climático extremo impactou o Produto Interno Bruto (PIB) regional em aproximadamente 0,58% e gerou perdas agrícolas estimadas em R$ 31 bilhões, evidenciando a vulnerabilidade dos sistemas de abastecimento e drenagem vigentes (SEPL,2025).

Diante deste cenário de vulnerabilidade, a Sanepar, em articulação com o Governo do Estado e o Banco Mundial, estruturou o Programa de Segurança Hídrica do Paraná (PSH-PR). Trata-se de uma iniciativa multissetorial com investimentos previstos de US$ 263 milhões, destinados a garantir a disponibilidade de água em quantidade e qualidade para múltiplos usos, fortalecendo a resiliência do estado diante de secas e enchentes (SEPL,2025).

O PSH-PR adota um mecanismo de financiamento que combina recursos externos com contrapartidas estaduais para modernizar o setor público e a gestão de riscos climáticos. Dentro desta moldura estratégica, o Projeto Reservas Hídricas do Iguaçu emerge como a principal frente de infraestrutura verde (SEPL,2025).

O Projeto Reservas Hídricas do Iguaçu é uma das maiores intervenções socioambientais da Região Metropolitana de Curitiba, a iniciativa consiste na destinação e adaptação de uma série de lagos e reservatórios interconectados formados por antigas cavas de mineração de areia, atualmente esgotadas, isso ao longo das várzeas do Rio Iguaçu. O projeto configura-se como uma intervenção de engenharia multiobjetivo fundamentada em Soluções baseadas na Natureza (SbN) e infraestrutura azul-verde.

Tecnicamente, permitirá o amortecimento de ondas de cheia mediante a implementação e adaptação das cavas existentes como bacias de detenção e reservatórios de acumulação ao longo da calha do Alto Iguaçu. Essa configuração visa a redução do hidrograma de pico em eventos hidrológicos extremos, mitigando o risco de inundação em áreas urbanas consolidadas através do controle cinético e volumétrico do escoamento superficial.

Além da regulação do fluxo pluvial, o projeto é um componente estratégico para a resiliência e segurança hídrica regional. Em cenários de estresse hídrico e estiagem prolongada, os reservatórios funcionam como estoques reguladores que permitem a manutenção de vazões ecológicas (sanitárias) e auxiliam na perenidade do manancial para o abastecimento público.

Sob a ótica ecológica, a iniciativa promove a restauração de serviços ecossistêmicos, estabelecendo corredores biológicos que favorecem a conectividade de habitats e o sequestro de carbono, integrando a gestão de recursos hídricos ao planejamento urbano sustentável e à adaptação às mudanças climáticas.

Além da função técnica de drenagem e controle de cheias, o projeto foca na recuperação da biodiversidade local, criando corredores ecológicos e espaços de lazer para a população, o que equilibra a proteção ambiental com o desenvolvimento urbano sustentável.

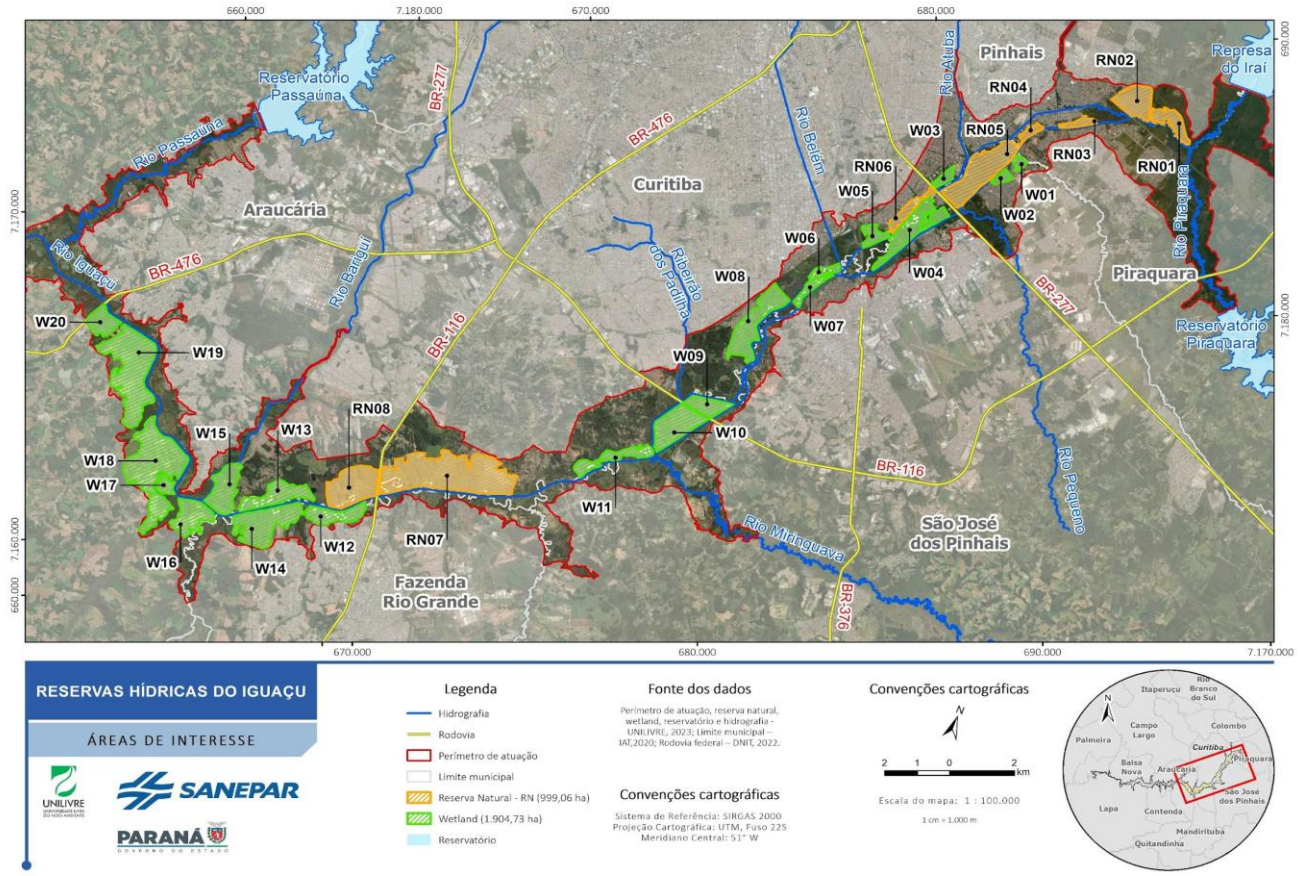


Figura 01 – Área de Abrangência do Projeto RHIgu
(Fonte: UNILIVRE, 2024)

Apesar de sua relevância ecológica, socioeconômica e climática, os ecossistemas wetlands estão entre os mais ameaçados do planeta. Conforme o Global Wetland Outlook, publicado pela Convenção de Ramsar, aproximadamente 35% das áreas úmidas foram suprimidas desde a década de 1970, e a taxa atual de degradação desses ambientes é três vezes superior à das florestas. As causas primárias estão associadas à conversão do uso do solo, urbanização não planejada, intensificação agropecuária, edificação de infraestruturas hidráulicas, e poluição de fontes difusas e pontuais (CONVENTION ON WETLANDS, 2018).

No contexto das Reservas Hídricas do Iguaçu, as wetlands atuais são de origem antrópica, resultante de processos intensivos de lavra para extração de areia, especialmente entre as décadas de 1970 e 1990. A exploração mineral, realizada por meio de dragagem e escavação a céu aberto, ocasionou a formação de cavas profundas com conexão direta ao lençol freático e posterior alagamento por contribuição subterrânea e aporte pluvial.

Com o esgotamento econômico da atividade e a ausência de planos de reabilitação ambiental pós-mineração, tais áreas foram abandonadas, desencadeando processos espontâneos de sucessão secundária e naturalização ecológica. A colonização inicial por espécies de macrófitas aquáticas, por exemplo, Salvinia spp., Pontederia crassipes, Pistia stratiotes e Typha domingensis, todas representativas de vegetação palustre, promoveu a estruturação de habitats funcionais (SANEPAR; UNILIVRE,2024).

Esse processo resultou na heterogeneidade ambiental e favoreceu o desenvolvimento da vegetação ripária ao longo das margens. Esse processo favorece ainda, o recrutamento de fauna associada, incluindo macroinvertebrados aquáticos, anfíbios, répteis, aves e pequenos mamíferos. Muitos destes grupos apresentam sensibilidade a distúrbios e, portanto, são considerados bioindicadores da integridade ecológica (SOUZA,2013).

Considerando a ecologia de paisagens, essas unidades se tornaram ao longo do tempo em ecossistemas semiautônomos, nos quais interações entre solo, água, vegetação e demais organismos da biota conferem características funcionais típicas de wetlands naturais, tais como: retenção de sedimentos, absorção de nutrientes, sequestro de carbono e modulação hidrológica local.

Conforme Prasanya, Kanmani e Kumar (2024) demonstram que áreas úmidas derivadas de mineração, quando submetidas a processos de restauração ecológica assistida, podem recuperar sua funcionalidade ecossistêmica em escalas comparáveis às de ecossistemas naturais de referência.

Portanto, as wetlands que compõem as Reservas Hídricas do Iguaçu compreendem um exemplo de reconversão ecológica dentro de um sistema antropizado, com potencial para integração em políticas de conservação da biodiversidade, provisão de serviços ecossistêmicos e planejamento territorial sustentável (APRH,2018).

O projeto foca na bacia do Alto Iguaçu, uma região de alta densidade populacional e demanda industrial, onde a estratégia concentra-se na proteção de mananciais e na criação de reservatórios estratégicos utilizando Soluções baseadas na Natureza (SbN). A premissa central é a requalificação de passivos ambientais — especificamente as antigas cavas de extração de areia nas margens do Rio Iguaçu, transformando-as em ativos de reservação e autodepuração hídrica (SANEPAR; UNILIVRE, 2024).

O projeto rompe com a lógica da engenharia de drenagem convencional, frequentemente baseada no paradigma de "canalizar e escoar", para adotar a filosofia SbN de "armazenar, depurar e infiltrar". Esta transição é operacionalizada através de pesquisas técnicas e científicas que visam transformar o Rio Iguaçu em um sistema resiliente, capaz de funcionar como bacia de amortecimento em períodos de cheia e como reserva estratégica em períodos de estiagem severa (APRH,2018).

O presente artigo foca no detalhamento das cinco atividades de pesquisa que podem dar suporte ao Projeto Reservas Hídricas do Iguaçu (RHIgu), analisando como a integração entre ciência, governança fundiária e inovação tecnológica, assim como as potencialidades na adaptação às mudanças climáticas.

Material e Métodos

A metodologia de desenvolvimento do Projeto Reservas Hídricas do Iguaçu fundamenta-se na integração de cinco pilares de pesquisa técnico-científica, projetados para fornecer os elementos necessários sustentabilidade das atividades estruturadas para cobrir desde a engenharia de processos biotecnológicos até a modelagem financeira e geotecnológica (SANEPAR; UNILIVRE,2024).

A governança do projeto adota os Princípios do Equador e as salvaguardas socioambientais do Banco Mundial. A metodologia envolve a aplicação da Engenharia de Valor para otimizar custos e a criação de planos de ação baseados em riscos, garantindo que as intervenções atendam a padrões internacionais de sustentabilidade e direitos humanos (IFC,2020).

O desenvolvimento dos PRADs segue as diretrizes do Instituto Água e Terra (IAT) e baseia-se na recuperação de Áreas de Preservação Permanente (APPs) e matas ciliares ao longo de 150 km de extensão fluvial. A estratégia metodológica foca na conversão de multas ambientais como fonte de financiamento. O processo envolve a elaboração de projetos de manejo de espécies invasoras e restauração ecológica terrestre, utilizando o mecanismo de compensação indireta, onde o infrator adere a projetos previamente disponibilizados pelo órgão ambiental (IAT,2024).

A atividade de pesquisa por bioenzimas foca na valoração biotecnológica do ecossistema das Reservas Hídricas. A conversão da biomassa seca em toneladas de carbono equivalente é realizada para subsidiar a emissão futura de créditos de carbono.Simultaneamente, a prospecção de bioenzimas envolve a coleta de sedimentos e amostras de água para identificação de microrganismos, como as actinobactérias, que produzem enzimas de interesse industrial lipases, pectinases, esterases (FERREIRA, JUNIOR,2025).

Para a quantificação de carbono baseia-se na determinação da biomassa de macrófitas aquáticas presentes nas wetlands e cavas. O procedimento envolve a amostragem em campo, medição do peso fresco e posterior secagem em estufa a 60 °C (por 12 a 18 horas) até obter o peso seco constante (SANTOS,2020).

Diferente do monitoramento físico-químico convencional, a gestão adaptativa utiliza macroinvertebrados bentônicos como bioindicadores de qualidade hídrica. O método emprega os índices BMWP' (Biological Monitoring Working Party) e ASPT (Average Score Per Taxon). A amostragem foca na diversidade da fauna de fundo, correlacionando a presença de táxons sensíveis à poluição com a integridade do ecossistema. Este modelo permite ajustes dinâmicos nas estratégias de manejo das wetlands com base na resposta biológica do sistema (SILVA,2020).

E como inovação para estes tipos de projetos segue a possibilidade de implementação do WebSIG baseia-se no software de código aberto GeoServer, integrado ao banco de dados PostgreSQL/PostGIS. A plataforma permite a interoperabilidade de dados através de padrões internacionais (WMS, WFS) e o processamento de ortofotos geradas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs). O sistema garante o monitoramento preciso da evolução das obras e da cobertura vegetal em toda a extensão do Rio Iguaçu (SANEPAR; UNILIVRE,2024).

Resultados e Discussão

Os estudos preliminares sobre a quantificação de carbono nas Reservas Hídricas indicam que as macrófitas aquáticas presentes nas wetlands funcionam como sumidouros permanentes de dióxido de carbono. A massa de vegetação acumulada no Rio Iguaçu, frequentemente vista como um entrave à navegação e manejo, revela-se um ativo ambiental de alta relevância. A conversão da biomassa em carbono permite que o projeto pleiteie créditos de carbono, criando um fluxo de receita adicional para a manutenção das Reservas Hidricas do Iguaçu (SANEPAR; UNILIVRE,2024).

A aplicação da biomassa retirada dos reservatórios, como o Piraquara II e o Iraí, em solos degradados demonstrou aumentar significativamente a riqueza florística e a velocidade de cobertura do solo em projetos de restauração.Este ciclo de "resíduo zero" transforma o custo de limpeza de canais em benefício para a restauração ambiental (IAT,2012).

Paralelamente, a prospecção de enzimas industriais em sedimentos de áreas úmidas abre portas para parcerias com a indústria biotecnológica. A identificação de microrganismos produtores de enzimas termoestáveis em ambientes de várzea demonstra que a conservação hídrica pode catalisar inovações em setores como o têxtil e de biocombustíveis, agregando valor econômico material à infraestrutura verde (FERREIRA, JUNIOR,2025).

A implementação dos PRADs via conversão de multas ambientais representa uma inovação administrativa significativa no Estado do Paraná. O programa permite que autuados destinem valores para os projetos de recuperação do Alto Iguaçu, obtendo

descontos de até 60% nas penalidades.15 Este mecanismo garante um fluxo constante de recursos para a restauração das APPs sem depender exclusivamente do orçamento direto do Estado (IAT,2024).

E a consolidação de áreas fragmentadas em grandes corredores ecológicos, aprovada pelo IAT, maximiza o ganho ambiental em comparação ao modelo de preservação em "ilhas" isoladas. Esta abordagem sistêmica é crucial para a resiliência da bacia do Alto Iguaçu, onde a fragmentação florestal histórica compromete os serviços ecossistêmicos de regulação hídrica (IAT,2024).

Os resultados esperados do uso de bioindicadores bentônicos oferecem uma visão muito mais sensível do estresse ambiental do que o monitoramento tradicional. A utilização dos índices BMWP' e ASPT permite identificar a presença de contaminantes orgânicos persistentes que análises físico-químicas instantâneas poderiam negligenciar. (SILVA,2020)

Em trechos do Rio Iguaçu, a transição de áreas urbanizadas para zonas de reserva é refletida pela mudança na diversidade de táxons macroinvertebrados. A presença de famílias sensíveis como os grupos EPT: (Ephemeroptera, Plecoptera e Trichoptera) em áreas de wetlands requalificadas valida a eficiência biológica dessas estruturas na autodepuração da água. A gestão adaptativa permite o ajuste as Taxas de Aplicação Hidráulica (TAH) das wetlands conforme a resposta da biota, otimizando a remoção de DBO e nutrientes sem o uso intensivo de produtos químicos (SOUZA,2013).

O alinhamento do projeto aos Princípios do Equador confere à Sanepar um diferencial competitivo em termos de governança corporativa e sustentabilidade. A adoção destes padrões internacionais, exigida pelo Banco Mundial, garante que os riscos físicos climáticos e os impactos nas comunidades locais sejam geridos de forma estruturada e contínua (IFC,2020).

A aplicação da Engenharia de Valor permitirá a otimização dos custos ao longo do ciclo de vida das infraestruturas verdes. Ao projetar sistemas que requerem baixo consumo de energia e manutenção simplificada (comparados a estações convencionais), o projeto atende aos critérios de eficiência exigidos pelos financiadores internacionais. Esta robustez institucional facilita a captação de novos recursos e posiciona o Paraná como um polo de investimento seguro para projetos de resiliência climática (IPECE,2025).

Sinteticamente, optou-se pela elaboração de uma Matriz SWOT, referente ao desenvolvimento de pesquisas técnico-científicas, estruturadas nas cinco atividades fundamentais: quantificação de carbono e bioenzimas; planos de restauração ambiental (PRAD); gestão adaptativa via bioindicadores e o Sistema de Informação Geográfica (WebSIG), conforme Tabela 01 a seguir.

Tabela 01 – Matriz SWOT

FORÇAS	**FRAQUEZAS**
Transição de paradigma da engenharia convencional para Soluções baseadas na Natureza (SbN) focadas em "armazenar, depurar e infiltrar".	Histórico de fragmentação florestal na bacia do Alto Iguaçu que compromete serviços ecossistêmicos.
Estrutura de pesquisa robusta em cinco pilares: carbono, restauração (PRAD), bioindicadores, planos de ação e WebSIG.	Origem antrópica das wetlands atuais (antigas cavas de mineração), exigindo restauração ecológica assistida.
Governança alinhada a padrões internacionais, como os Princípios do Equador e salvaguardas do Banco Mundial.	Percepção da biomassa de macrófitas como um entrave ou "custo de limpeza" em modelos de gestão tradicionais.
Uso de tecnologias avançadas de monitoramento, como WebSIG, Geoserver e drones (VANTs).	Vulnerabilidade sistêmica da região a pressões antropogênicas intensas e urbanização não planejada.
OPORTUNIDADES	**AMEAÇAS**
Monetização de serviços ecossistêmicos através da emissão de créditos de carbono.	Eventos climáticos extremos recorrentes, como secas severas e inundações.
Potencial de inovação biotecnológica e parcerias industriais via prospecção de bioenzimas em sedimentos.	Taxa global e local de degradação de áreas úmidas superior à das florestas.
Modelo de financiamento sustentável inovador por meio da conversão de multas ambientais.	Poluição hídrica proveniente de fontes difusas e pontuais decorrentes do uso do solo.
Atração de capital internacional devido ao rigor institucional e foco em resiliência climática.	Risco de invasões ou novas degradações em áreas de mananciais e reservas.
Criação de corredores ecológicos que maximizam o ganho ambiental frente ao modelo de "ilhas" isoladas.	Impactos econômicos significativos causados por déficits pluviométricos no PIB regional e agricultura.

(Fonte: Autores,2026)

Considerações Finais

O modelo de infraestrutura verde estruturado no Projeto Reservas Hídricas do Iguaçu e no PSH-PR, representa uma mudança de paradigma fundamental na gestão de recursos hídricos no Brasil. A transição da engenharia convencional para o paradigma de "armazenar, depurar e infiltrar" demonstra ser a estratégia mais eficaz para garantir a resiliência da Região Metropolitana de Curitiba diante de extremos climáticos (SANEPAR; UNILIVRE, 2024).

Em suma, as cinco frentes de pesquisa técnica e científica propostas fundamentam a viabilidade econômica, ambiental e jurídica do projeto. Ao integrar a valoração do carbono e a prospecção biotecnológica à criação de ativos ambientais, o modelo transfigura a conservação de um custo operacional em um vetor de desenvolvimento econômico.

Somado a isso, a gestão adaptativa via bioindicadores e a transparência do WebSIG consolidam uma governança pública de alta eficiência, frente aos modelos contratuais convencionais, os projetos de pesquisa não apenas otimizam recursos públicos, mas possuem potencial para atrai capital internacional, isso por meio de salvaguardas rigorosas, ratificando o Paraná como a principal referência nacional em infraestrutura verde (SANEPAR; UNILIVRE, 2024).

A interoperabilidade do sistema permite que técnicos da Sanepar, IAT e AMEP compartilhem informações geoespaciais críticas, facilitando a fiscalização de invasões ou degradações em áreas de mananciais. Esta ferramenta tecnológica é a base para a governança moderna de bacias hidrográficas, permitindo que o estado gerencie seus ativos hídricos com a precisão necessária para enfrentar os desafios climáticos do século XXI (PARANÁ,2026).

O projeto de desenvolvimento de pesquisas cientificas para as cinco atividades neste artigo abordados, demonstra que é possível transformar passivos ambientais e minerários em ativos estratégicos, garantindo água em quantidade e qualidade para as futuras gerações enquanto se restaura a biodiversidade e se promove o bem-estar social.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), ao Instituto Água e Terra (IAT), à Secretaria do Planejamento (SEPL) e ao Banco Mundial pelo suporte institucional e financeiro que viabilizou o desenvolvimento do Programa de Segurança Hídrica do Paraná e do Projeto Reservas Hídricas do Iguaçu. Agradecimentos especiais às equipes técnicas da AMEP e das prefeituras da Região Metropolitana de Curitiba, a UNILIVRE e ITTI/UFPR pela cooperação.

Referências Bibliográficas

APRH - ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE RECURSOS HÍDRICOS. Recursos Hídricos, v. 39, n. 1, 2018. Disponível em: https://www.aprh.pt/rh/pdf/v39n1.pdf. Acesso em: 12 abr. 2026.

CEARÁ. IPECE. Relatório de Desempenho do Projeto – 1º Semestre 2025. Fortaleza, 2026. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2026/01/RELATORIO-DESEMPENHO_1-SEMESTRE_2025.pdf. Acesso em: 12 abr. 2026.

CONVENTION ON WETLANDS. Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and their Services to People. Gland, Suíça: Ramsar Convention Secretariat, 2018. Disponível em: https://www.global-wetland-outlook.ramsar.org/. Acesso em: 12 abr. 2026.

IFC EQUATOR PRINCIPLES. Os Princípios do Equador (EP4)., jul. 2020. Disponível em: https://equator-principles.com/app/uploads/EP4_Portuguese.pdf. Acesso em: 12 abr. 2026.

LIMA, R. et al. Aplicação dos índices biológicos Biological Monitoring Working Party e Average Score per Taxon para avaliar a qualidade de água do rio Ouricuri no Município de Capanema, Estado do Pará, Brasil. ResearchGate, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/308812568. Acesso em: 12 abr. 2026.

MARCON, R. A.; LIMA, J. B. de. Relatório Parcial: Metodologia de Compensação Urbanística e Ambiental. Curitiba: UNILIVRE, 2026.

PARANÁ. Agência Estadual de Notícias. IAT divulga selecionados para novo ciclo do Programa de Conversão de Multas. Curitiba, 2024. Disponível em: https://www.parana.pr.gov.br/aen/Noticia/IAT-divulga-selecionados-para-novo-ciclo-do-Programa-de-Conversao-de-Multas. Acesso em: 12 abr. 2026.

PARANÁ. Instrução Normativa IAT nº 2, de 27 de agosto de 2024. Dispõe sobre os procedimentos para conversão de multas ambientais. Curitiba: LegisWeb, 2024. Disponível em: https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=463860. Acesso em: 12 abr. 2026.

PARANÁ. Instituto Água e Terra (IAT). Macrófitas Aquáticas nos Reservatórios de Abastecimento Público da Sanepar: Biomassa, C, N e Manejo. Curitiba, 2012. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-12/projeto_441_2012.pdf. Acesso em: 12 abr. 2026.

SEPL, Secretária de planejamento do Estado Paraná. Programa de Segurança Hídrica. Curitiba, 2025. Disponível em: https://www.planejamento.pr.gov.br/Pagina/Programa-de-Seguranca-Hidrica. Acesso em: 12 abr. 2026.

PRASANYA, A.; KANMANI, S.; KUMAR, P. S. Integrated approach for the restoration of mining-impacted wetlands: A review on ecological mechanisms and recovery assessment. Chemosphere, v. 349, p. 140810, fev. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140810. Acesso em: 12 abr. 2026.

SANEPAR; UNILIVRE. Sanepar apresenta projeto Reserva Hídrica do Iguaçu ao Pró-Metrópole. Agência Estadual de Notícias, Curitiba, 2024. Disponível em: https://www.parana.pr.gov.br/aen/Noticia/Sanepar-apresenta-projeto-Reserva-Hidrica-do-Iguacu-ao-Pro-Metropole. Acesso em: 12 abr. 2026.

SANTOS, R. et al. Prospecção de enzimas de interesse industrial produzidas por actinobactéria isolado de solo rizosférico da Amazônia. Scientia Plena, v. 16, n. 4, 2020. Disponível em: https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/3094. Acesso em: 12 abr. 2026.

SILVA, J. M. A Influência Antrópica na Qualidade da Água e nas Comunidades de Macroinvertebrados Bentônicos. UNESP, 2025. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstreams/c2214b6e-f433-4b3a-a0d8-a7463dcc232b/download. Acesso em: 12 abr. 2026.

SOUZA, A. C. B. Uso de “wetland” construído no tratamento de efluente de ranicultura. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – UNESP, Sorocaba, 2013. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstreams/e75db548-9cc4-44c6-b788-6b293abe4f22/download. Acesso em: 12 abr. 2026.

INFRAESTRUTURA VERDE URBANA E SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS: O CASO DO PARQUE LAGO DE OLARIAS EM PONTA GROSSA (PR)

1 Lucelia Smaha, 2 Khalyd Artigas da Silva, 3 Lia Maris Orth Ritter Antiqueira
1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e-mail: luceliasmaha@gmail.com; 2 Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), e-mail: khalyd11@gmail.com; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e-mail:liaantiqueira@utfpr.edu.br

Palavras-chave: Conforto térmico; resiliência urbana; drenagem urbana.

Resumo

O crescimento das áreas urbanas evidencia a necessidade de estratégias que auxiliem na melhoria da qualidade ambiental nas cidades. Nesse contexto, as infraestruturas verdes e azuis destacam-se por sua capacidade de prestar serviços ecossistêmicos e de contribuir para o conforto térmico urbano. O presente trabalho tem como objetivo analisar as contribuições do Parque do Lago de Olarias, localizado em Ponta Grossa (PR), para a oferta de serviços ecossistêmicos e a melhoria das condições ambientais urbanas. A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso, de abordagem qualitativa e caráter exploratório, baseado em dados secundários obtidos por meio de levantamento bibliográfico e documental. Os resultados indicam que o parque desempenha papel relevante na regulação do escoamento superficial, na atenuação das temperaturas urbanas e na conservação da biodiversidade, além de atuar como espaço de lazer e de aproximação da população ao meio ambiente. No entanto, foram identificadas limitações relacionadas à gestão e manutenção do espaço, como o assoreamento do lago, que comprometem a efetividade de suas funções ecossistêmicas. Conclui-se que, embora o Parque do Lago de Olarias apresente elevado potencial como infraestrutura verde e azul, a consolidação de políticas públicas e instrumentos de gestão ambiental é fundamental para o pleno desenvolvimento de suas potencialidades.

Introdução

A população brasileira vive majoritariamente em áreas urbanas, com cerca de 177,5 milhões de habitantes, o que corresponde a mais de 87% do total (IBGE, 2024). Caracterizado pela intensa concentração de pessoas e pelo desenvolvimento de funções residenciais, comerciais, de prestação de serviços e industriais, o espaço urbano é também um produto das interações sociais (Corrêa, 1995).

As populações urbanas frequentemente enfrentam problemas como o aumento da sensação térmica, a intensificação da poluição atmosférica e a impermeabilização do solo, fator que contribui para a ocorrência de alagamentos. A combinação desses elementos com os desdobramentos das mudanças climáticas desafia a sociedade a desenvolver estratégias que promovam melhores condições de vida nas cidades.

Diante desse cenário, a existência e a manutenção de infraestruturas verdes urbanas, como parques urbanos, podem auxiliar no enfrentamento dessa problemática, uma vez que oferecem serviços ecossistêmicos, contribuem para a preservação de mananciais, para a melhoria da qualidade do ar e para a atenuação da sensação térmica, além de servir como espaços de lazer para a população (Loboda; De Angelis, 2005).

Além disso, os investimentos na manutenção desses parques relacionam-se diretamente a alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, adotados em 2015 por 193 países. Formado por 17 objetivos e 169 metas de ação global, abrange diversos temas, entre eles a degradação ambiental e o uso dos recursos naturais (Brasil, 2026).

Nesse cenário, destaca-se o Lago de Olarias como um importante espaço urbano com potencial para a oferta de serviços ecossistêmicos e melhoria das condições ambientais.

Assim, o presente estudo tem como objetivo analisar as contribuições do Lago de Olarias para a oferta de serviços ecossistêmicos e para a melhoria do conforto térmico urbano em Ponta Grossa (PR).

Referencial teórico

A concentração de habitantes em áreas urbanas exige ações eficazes para enfrentar as mudanças climáticas. Nesse contexto, o investimento em infraestruturas urbanas verdes, com vistas à manutenção dos serviços ecossistêmicos, configura-se como uma estratégia fundamental para a melhoria da qualidade ambiental e do bem-estar da população.

Estruturas como parques urbanos contribuem para a implementação do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11, que busca tornar as cidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis, além de apresentarem valor estratégico no enfrentamento das mudanças climáticas, conforme proposto pelo ODS 13 (Brasil, 2026), ao integrarem elementos de infraestrutura verde e azul e favorecerem a provisão de serviços ecossistêmicos.

Os serviços ecossistêmicos correspondem aos benefícios que os seres humanos obtêm dos ecossistemas, resultantes da interação entre elementos bióticos e abióticos. Esses serviços são classificados em quatro categorias: provisão - relacionada ao fornecimento de alimentos e água; regulação - associada a processos climáticos e ambientais; culturais - vinculados a benefícios recreativos e simbólicos; e de suporte - ligados à formação do solo e ao ciclo de nutrientes (Millennium Ecosystem Assessment, 2003).

Nesse sentido, os serviços ecossistêmicos desempenham papel fundamental na melhoria da qualidade de vida, influenciando diretamente a saúde, o bem-estar e as práticas sociais da população (Millennium Ecosystem Assessment, 2003).

Espaços que atuam como provedores de serviços ecossistêmicos apresentam, em geral, elevado grau de integração entre infraestruturas verdes e azuis, que exercem influência direta sobre o conforto térmico urbano, especialmente em áreas caracterizadas pela predominância de superfícies impermeáveis e estruturas antrópicas (Dacanal; Labaki; Silva, 2010).

O conforto térmico é influenciado por variáveis ambientais, como temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento, e também é condicionado por fatores adaptativos e pelas características do ambiente urbano. De modo geral, temperaturas entre 18 °C e 26 °C são consideradas adequadas para a sensação de conforto térmico, podendo variar conforme o contexto climático e a adaptação da população (Givoni, 1979 *apud* Bartholomei, 2003; Rossi; Krüger; Bröde, 2012).

Nesse contexto, a análise de espaços urbanos que incorporam infraestruturas verdes e azuis, como o Parque do Lago de Olarias, torna-se relevante para compreender como esses ambientes contribuem para a oferta de serviços ecossistêmicos e para a melhoria do conforto térmico no meio urbano.

Metodologia

A presente pesquisa é de caráter exploratório, com abordagem qualitativa, caracterizando-se como um estudo de caso que analisa as contribuições do Parque do Lago de Olarias para o enfrentamento das exigências climáticas.

Utilizaram-se dados secundários obtidos por meio de bibliografia e documentos para a análise das contribuições do parque em itens como regulação térmica, preservação de recursos hídricos e espaço de lazer, alinhados às propostas dos ODS.

Resultados e Discussões

O Parque do Lago de Olarias, localiza-se no bairro com o mesmo nome, próximo à área central do município de Ponta Grossa, PR (Figura 1), sendo formado por um lago artificial e estruturas como pista de caminhada/corrida, ciclovia, quadras poliesportivas, entre outras, o que o torna um dos principais atrativos turísticos da região (CEA *apud* Correia, 2023).

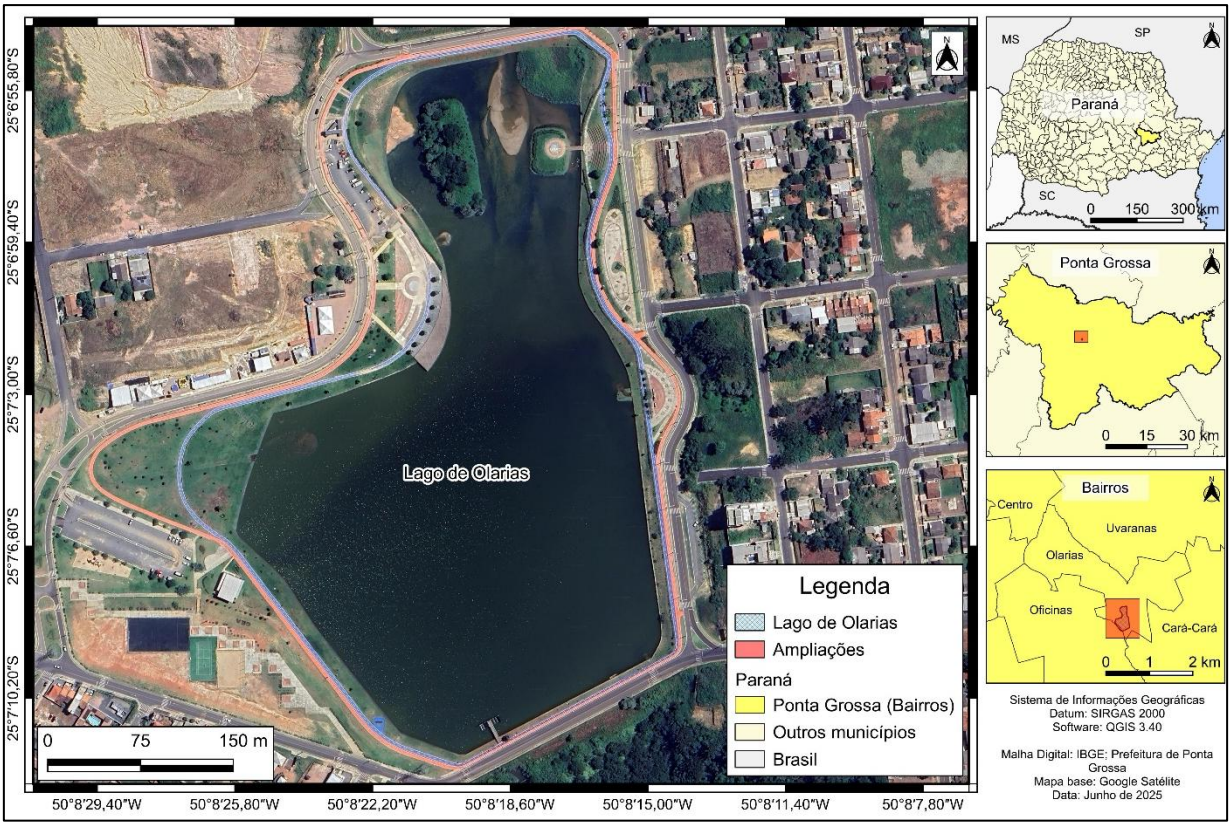


Figura 01: Localização do Lago de Olarias – Ponta Grossa, PR.
Fonte: elaborado por Artigas (2025)

O espaço é derivado de um projeto intitulado "Planejamento Ecológico do Arroio de Olarias I", que teve início em meados da década de 1990, mas as obras só começaram em 2004 e foram paralisadas no mesmo ano. Em 2014, as obras foram retomadas e, em 2020, o parque foi entregue à população (Correia, 2023). Na figura 2 observa-se a evolução das intervenções realizadas na área e sua configuração atual.

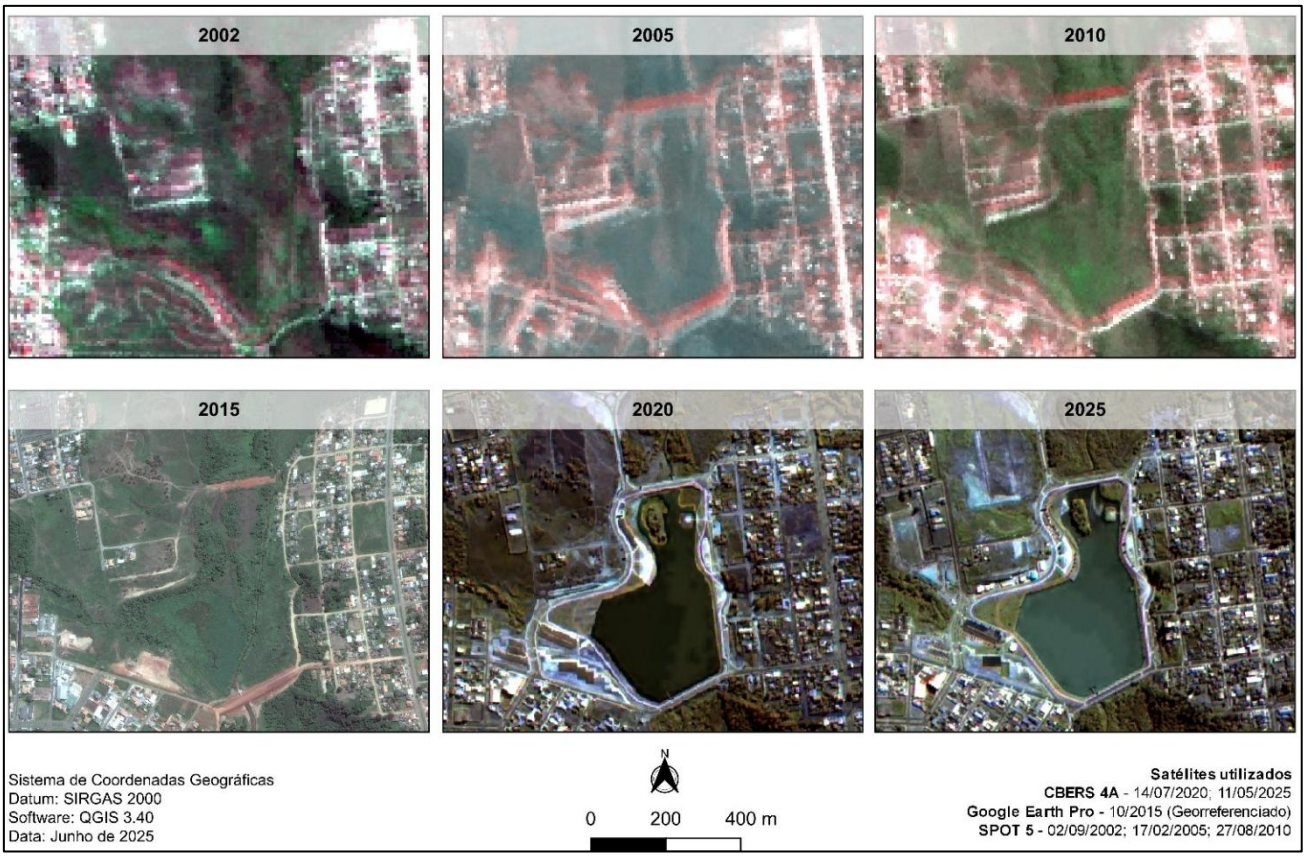


Figura 02: Evolução das obras e configuração atual do Parque do Lago de Olarias – Ponta Grossa, PR
Fonte: elaborado por Artigas (2025)

O lago é um elemento artificial da paisagem e tem a função de drenar as águas pluviais do centro de Ponta Grossa. Com área de aproximadamente 30 hectares, desempenha um papel estratégico no controle do escoamento superficial (Correia, 2023).

De acordo com Londe e Mendes (2014), as áreas verdes, aliadas a políticas públicas eficazes, são fundamentais na resolução de problemas como a poluição do ar e a atenuação da temperatura, além de contribuírem para a saúde física e mental da população.

No caso do parque estudado, há uma grande quantidade de espécies arbóreas em desenvolvimento, uma vez que a estrutura do local é recente. Em 2025, a prefeitura municipal organizou o plantio de mais 60 novas mudas, sendo 30 de aroeira-salsa (Schinus molle) e 30 de dedaleiro (Lafoensia pacari) (Prefeitura Municipal de Ponta Grossa, 2025). Conforme Mendes da Silva, Ruggiero Gonzalez e Ferreira da Silva Filho (2011), a arborização urbana, como a do parque, promove a formação de microclimas com melhores condições de conforto térmico e qualidade ambiental. A sensação de bem-estar nos espaços urbanos depende, em grande medida, da ventilação natural e da incidência solar, que pode ser atenuada pelo sombreamento proporcionado pelas árvores. Nesse sentido, as árvores auxiliam na refrigeração dos municípios, contribuem para a conservação de energia e, por meio da evapotranspiração, reduzem as temperaturas, favorecendo a existência de espaços mais agradáveis à presença humana.

O local abriga ainda diversas espécies de aves, como garça, biguá, socó-cinzento, pato selvagem, frango-d'água e quero-quero, além de capivaras e peixes (Correia, 2023), contribuindo para a conservação da biodiversidade e alinhando-se ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 15, que visa o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, combatendo a degradação do solo e protegendo a biodiversidade (Brasil, 2026).

Do ponto de vista arquitetônico, o parque é considerado multifuncional, atuando por meio de infraestruturas verdes e azuis, formadas por elementos naturais e artificiais que contribuem para a melhoria da qualidade de vida e para a resiliência urbana no enfrentamento às mudanças climáticas (Gomes; Veról, 2020).

No que diz respeito ao lago, destaca-se sua contribuição para o controle do escoamento superficial, especialmente considerando que o município de Ponta Grossa apresenta índices pluviométricos elevados, com médias anuais entre 1.600 e 1.800 mm. Nesse contexto, as infraestruturas azuis desempenham papel fundamental ao recriar elementos do ciclo hidrológico, favorecendo a infiltração da água no solo, a retenção do escoamento superficial e a redução do risco de alagamentos (Cruz, 2007).

Ademais, a qualidade de vida urbana tende a melhorar significativamente quando há valorização de áreas verdes, uma vez que esses espaços contribuem diretamente para o conforto da população, abrangendo aspectos relacionados à saúde física e mental. Nesse sentido, as discussões acerca do Parque do Lago de Olarias corroboram os achados de Londe e Mendes (2014), que destacam o papel das áreas verdes na regulação térmica e no bem-estar social.

Além disso, a presença de vegetação associada a corpos hídricos constitui um fator relevante na regulação térmica do ambiente urbano. Dados do SIMEPAR indicam que o município registrou temperaturas médias entre 20 °C e 23 °C nos meses

de dezembro a março, no período de 2020 a 2025, com temperaturas máximas médias variando entre 26 °C e 29 °C (SIMEPAR, 2026, comunicação pessoal). Em áreas urbanas com elevada densidade construtiva, observa-se a tendência de formação de ilhas de calor, decorrente da capacidade dos materiais utilizados nas edificações de absorver e reter calor, associada à intensa incidência de radiação solar, fazendo com a percepção térmica da temperatura por parte da população esteja acima das médias citadas. Isso evidencia as contribuições do parque, pois, as áreas que apresentam cobertura vegetal significativa contribuem para a amenização dessas condições, favorecendo a redução das temperaturas e a melhoria do conforto térmico urbano (Amorim, 2010). Os autores reconhecem a limitação do artigo por apresentar dados secundários e não aprofundar pesquisas *in loco*, o que impediu a obtenção de dados mais aprofundados sobre o microclima local.

Dessa forma, o Parque do Lago de Olarias destaca-se como uma infraestrutura urbana multifuncional, atuando simultaneamente na regulação hídrica e térmica, contribuindo para a adaptação do espaço urbano às condições climáticas locais.

Além disso, o investimento em estruturas como o Lago de Olarias, que conciliam atividades de lazer com a aproximação da população a áreas com elementos naturais, pode contribuir diretamente para o fortalecimento da biofilia, entendida como a tendência humana de estabelecer conexões com a natureza por meio do contato cotidiano, promovendo uma aproximação entre sociedade e ambiente natural (Kaick, 2020). Essa abordagem mostra-se fundamental para estimular a participação social em estratégias de mitigação das mudanças climáticas, considerando que ações locais possuem relevância significativa no contexto global.

O projeto inicial do parque previa a construção de cinco lagos, dos quais apenas o primeiro encontra-se concluído, enquanto o segundo está em fase de implantação. O parque está inserido na Área de Preservação Ambiental (APA) de Olarias, instituída pelo Decreto nº 25.435, de 11 de julho de 2025, e classificada como Unidade de Conservação de Uso Sustentável, conforme estabelecido pela Lei nº 9.985/2000, que considera áreas de relevante valor ecológico e de presença significativa de ocupação humana em seu entorno (Brasil, 2000).

De acordo com o decreto municipal, a APA deverá ter seu plano de manejo elaborado no prazo de até dois anos a partir de sua criação. Nesse contexto, o avanço na regulamentação e na implementação de instrumentos de gestão ambiental mostra-se fundamental para o adequado funcionamento do parque. A morosidade na consolidação dessas medidas tem limitado o pleno desenvolvimento de suas potencialidades, como evidenciam problemas recorrentes, como o assoreamento do lago, que compromete não apenas a estética da paisagem, mas também a biodiversidade local.

Em março de 2026, foram iniciadas obras para a remoção de sedimentos acumulados no lago, com a previsão de retirada de aproximadamente 70 mil m³. A intervenção está estruturada em quatro etapas, que incluem drenagem, limpeza e recomposição do nível da água, com duração estimada superior a 9 meses (Prefeitura Municipal de Ponta Grossa, 2026).

Embora o parque apresente elevado potencial turístico e se configure como um importante espaço de lazer e de aproximação da população à temática ambiental, as fragilidades em sua gestão e manutenção limitam significativamente sua efetividade na prestação de serviços ecossistêmicos.

Nesse contexto, o Parque do Lago de Olarias evidencia-se como uma infraestrutura verde e azul relevante no ambiente urbano de Ponta Grossa, contribuindo para a regulação térmica e hídrica e para a oferta de serviços ecossistêmicos. No entanto, sua efetividade encontra-se condicionada a aspectos relacionados à gestão e à manutenção, o que indica a necessidade de maior integração entre o planejamento urbano e as políticas públicas ambientais.

Considerações finais

De modo geral, o Parque do Lago de Olarias se caracteriza como uma importante infraestrutura verde e azul no contexto urbano, contribuindo para a regulação da térmica e hídrica e oferecendo serviços ecossistêmicos que beneficiam diretamente a qualidade de vida da população. Sua relevância se insere no contexto das estratégias de enfrentamento às mudanças climáticas e na promoção da resiliência urbana, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente os ODS 11, 13 e 15.

Entretanto, as fragilidades relacionadas à gestão e manutenção do espaço, evidenciadas por problemas como o assoreamento e a ausência de instrumentos plenamente implementados, limitam a efetividade de suas potencialidades. Nesse sentido, trabalho proposto evidencia os desafios enfrentados por cidades médias brasileiras, destacando a necessidade de planejamento urbano integrado e da consolidação de políticas públicas voltadas à gestão de infraestruturas verdes e azuis. Por fim, ressalta-se a importância de avanços na implementação do plano de manejo propõem-se estudos futuros com dados primários, de modo a aprofundar a compreensão das dinâmicas socioambientais do parque do Lago de Olarias.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e a Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. Climatologia e gestão do espaço urbano. **Mercator-Revista de Geografia da UFC**, v. 9, n. 1, p. 71-90, 2010.

BRASIL. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – Agenda 2030. Disponível em: https://odsbrasil.gov.br/home/agenda. Acesso em: 29 mar. 2026.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza – SNUC e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 19 jul. 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm. Acesso em: 14 abr. 2026.

BARTHOLOMEI, Carolina Lotufo Bueno. **Influência da vegetação no conforto térmico urbano no ambiente construído.** Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Estadual de Campinas, 2003.

CORRÊA, Roberto Lobato. **O Espaço Urbano**. 3ª Ed. São Paulo: Editora Ática. S.A, 1995.

CORREIA, Gabrieli Ferreira. **Considerações prévias sobre o perfil de visitantes do Lago de Olarias – Ponta Grossa (PR).** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado em Turismo) Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2023.

CRUZ, Gilson Campos Ferreira da. Alguns aspectos do clima dos Campos Gerais. *In*: MELO, Mário Sérgio de; MORO, Rosemeri Segecin; GUIMARÃES, Gilson Burigo. **Patrimônio natural dos Campos Gerais do Paraná.** Ponta Grossa: Editora UEPG, 2007. Cap. 5, p.59-72.

DACANAL, Cristiane; LABAKI, Lucila Chebel; SILVA, Talita Meulman Leite da. Vamos passear na floresta! O conforto térmico em fragmentos florestais urbanos. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 2, p. 115-132, 2010.

GOMES, Maria Vitória Ribeiro; VERÓL, Aline Pires. Paisagens multifuncionais: o papel das infraestruturas verdes e azuis na recuperação de rios urbanos. *In*: Encontro Nacional De Tecnologia do Ambiente Construído, 18., 2020. Anais [...]. Porto Alegre: **ANTAC**, 2020. p. 1–8. DOI: 10.46421/entac.v18i.704. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/704. Acesso em: 1 abr. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo 2022: 87% da população brasileira vive em áreas urbanas. Agência de Notícias IBGE, Rio de Janeiro, 14 nov. 2024. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/41901-censo-2022-87-da-populacao-brasileira-vive-em-areas-urbanas. Acesso em: 15 mar. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Panorama – Ponta Grossa, PR. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/ponta-gro ssa/panorama . Acesso em: 14 abr. 2026.

KAICK, Tamara Simone van. et al. Ressignificação da paisagem urbana por meio da implementação de Wetlands Construídos. *In*: ARAUJO-LIMA, C. (Org.). **Sustentabilidade urbana**: processo espacial e socioambiental. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2020, p. 259-303.

LOBODA, Carlos Roberto; DE ANGELIS, Bruno Luiz Domingos. Áreas verdes públicas urbanas: conceitos, usos e funções. **Ambiência,** Guarapuava, v. 1, n. 1, p. 125-139, jan./jun.,2005. Disponível em: https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/viewFile/157/185. Acesso em: 14 abr. 2026.

LONDE, Patrícia Ribeiro; MENDES, Paulo Cezar. A influência das áreas verdes na qualidade de vida urbana. **Hygeia - Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, Uberlândia, v. 10, n. 18, p. 264-272, 2014. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/26487. Acesso em: 14 abr. 2026.

MENDES DA SILVA, Isadora; RUGGIERO GONZALEZ, Luciana; SILVA FILHO, Demóstenes Ferrera da. Recursos naturais de conforto térmico: um enfoque urbano. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, *[S. l.],* v. 6, n. 4, p. 35–50, 2011. DOI: 10.5380/revsbau.v6i4.66487. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/revsbau/article/view/66487 . Acesso em: 14 abr. 2026.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Washington, DC: Island Press, 2003. Disponível em: https://www.millenniumassessment.org/documents/document.446.aspx.pdf. Acesso em: 31 mar. 2026.

PONTA GROSSA. Decreto nº 25.435, de 20 de agosto de 2025. Dispõe sobre a criação da Área de Proteção Ambiental de Olarias (APA de Olarias) na Bacia do Arroio de Olarias, que menciona, e dá outras providências. **Leis Municipais**, *[s. l.],* 20 ago. 2025. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/a/pr/p/ponta-grossa/decreto/2025/2544/25435/decreto-n-25435-2025-dispoe-sobre-a-criacao-da-area-de-protecao-ambiental-de-olarias-apa-de-olarias-na-bacia-do-arroio-de-olarias-que-menciona-e-da-outras-providencias-conforme?q=n. Acesso em: 23 ago. 2025.

Prefeitura de Ponta Grossa. Prefeitura inicia desassoreamento do Lago de Olarias, 9 mar. Disponível em: https://www.pontagrossa.pr.gov.br/2026/03/09/prefeitura-inicia-desassoreamento-do-lago-de-olarias/. Acesso em: 02 abr. 2026.

Prefeitura de Ponta Grossa. Prefeitura planta árvores nativas no Lago de Olarias. Ponta Grossa, 10 fev. 2025. Disponível em: https://www.pontagrossa.pr.gov.br/2025/02/10/prefeitura-planta-arvores-nativas-no-lago-de-olarias/. Acesso em: 31 mar. 2026.

ROSSI, Francine Aidie; KRÜGER, Eduardo Leite; BRÖDE, Peter. Definição de faixas de conforto e desconforto térmico para espaços abertos em Curitiba, PR, com o índice UTCI. **Ambiente construído**, v. 12, n. 1, p. 41-59, 2012.

SIMEPAR – Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná. Dados meteorológicos enviados por e-mail em: 13 mar. 2026. Destinatária: Lucélia Smaha. Comunicação pessoal.

CIDADES ESPONJA E INFRAESTRUTURA VERDE NA MITIGAÇÃO DE ENCHENTES URBANAS: ANÁLISE HIDRODINÂMICA APLICADA AO RIBEIRÃO ARRUDAS, BELO HORIZONTE

1 Talita Silvia de Souza, 2 Staël de Alvarenga Pereira Costa
1 Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: talita_sil@outlook.com; 2 Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: sapc@ufmg.br

Palavras-chave: drenagem urbana; infraestrutura verde; cidades esponja.

Resumo

A intensificação de eventos extremos de precipitação tem ampliado significativamente a ocorrência de enchentes urbanas, configurando um dos principais desafios ambientais contemporâneos. Esse fenômeno está diretamente relacionado à impermeabilização do solo, à canalização de cursos d'água e às limitações dos sistemas convencionais de drenagem urbana, baseados na rápida condução das águas pluviais. Nesse contexto, o conceito de cidades esponja emerge como abordagem inovadora de adaptação climática, propondo a incorporação de soluções baseadas na natureza capazes de restaurar processos do ciclo hidrológico no ambiente urbano. Diante desse cenário, o presente estudo analisa a aplicação desse conceito como estratégia ambiental para mitigação de enchentes, com foco na bacia do Ribeirão Arrudas, em Belo Horizonte. A metodologia integra revisão teórica, análise espacial em Sistemas de Informação Geográfica e modelagem hidrodinâmica por meio do software HEC-RAS, permitindo identificar áreas críticas de inundação e avaliar cenários de intervenção. Os resultados demonstram que a adoção de infraestrutura verde incluindo parques alagáveis, jardins de chuva, pavimentos permeáveis e revegetação de margens contribui para a redução do escoamento superficial e para o aumento da capacidade de infiltração, retenção e retardamento das águas pluviais. A proposta de implantação de um sistema de parque esponja ao longo do curso d'água evidencia o potencial das cidades esponja na promoção da resiliência urbana, na redução de riscos hidrológicos e na requalificação ambiental da paisagem. Conclui-se que a integração entre planejamento urbano, engenharia ambiental e o conceito de cidades esponja constitui uma estratégia eficaz e sustentável para o enfrentamento das enchentes urbanas em contextos altamente urbanizados.

Introdução

A intensificação das enchentes urbanas nas últimas décadas tem evidenciado as limitações dos modelos convencionais de drenagem adotados nas cidades contemporâneas. A rápida expansão urbana, aliada à crescente impermeabilização do solo e à canalização dos cursos d'água, provocou alterações significativas no funcionamento do ciclo hidrológico em áreas urbanizadas. Como resultado, eventos de precipitação intensa passaram a gerar impactos cada vez mais expressivos sobre a infraestrutura urbana, os sistemas de mobilidade e as condições de vida da população (Costa e Rodrigues, 2025; Sales et al., 2025; Carneiro et al., 2026).

No contexto da urbanização moderna, rios e córregos foram progressivamente incorporados à malha urbana por meio de processos de retificação, canalização e confinamento, consolidando um modelo de drenagem centrado na rápida condução das águas pluviais por sistemas artificiais. Embora esse paradigma tenha viabilizado a expansão das cidades ao longo do século XX, ele também intensificou o escoamento superficial e reduziu a capacidade de infiltração do solo, contribuindo para o agravamento das enchentes em áreas urbanas (Canholi, 2005; Baptista; Nascimento; Barraud, 2005). Nesse sentido, a predominância de soluções baseadas em infraestrutura cinza revela-se insuficiente diante da complexidade dos processos hidrológicos urbanos e das demandas ambientais contemporâneas.

Diante desse cenário, diferentes campos do conhecimento, como o urbanismo, a arquitetura da paisagem e a ecologia urbana, têm questionado esse modelo tradicional, propondo abordagens mais integradas e sustentáveis. Nesse contexto, a gestão ambiental urbana assume papel central, ao buscar conciliar o planejamento do território com a dinâmica dos sistemas naturais, especialmente no que se refere ao manejo das águas pluviais. A incorporação de soluções baseadas na natureza e de estratégias como as cidades esponja representa uma mudança de paradigma, ao priorizar processos como infiltração, retenção e armazenamento da água no próprio ambiente urbano (Morais, 2022).

Belo Horizonte, assim como outras grandes cidades brasileiras, apresenta um histórico de ocupação urbana que nem sempre considerou adequadamente as características ambientais do território, resultando em um cenário de elevada vulnerabilidade a eventos hidrológicos extremos (Souza, 2020; Morais, 2022). Nas últimas décadas, a recorrência de alagamentos e inundações, especialmente durante o período chuvoso, tem se intensificado, refletindo tanto as transformações urbanas quanto os efeitos das mudanças climáticas, que vêm ampliando a frequência e a intensidade das precipitações.

A configuração urbana da capital mineira é marcada por intervenções que alteraram profundamente sua rede hidrográfica, incluindo a canalização e o ocultamento de diversos cursos d'água (Borsagli, 2019). Esses processos resultaram na aceleração do escoamento superficial e na redução da capacidade de amortecimento natural das cheias, favorecendo a ocorrência de inundações em áreas densamente urbanizadas. Soma-se a isso a presença de um relevo acidentado e as limitações do sistema de drenagem existente, fatores que, em conjunto, intensificam a vulnerabilidade ambiental da cidade. Nesse contexto, as mudanças climáticas reforçam esse quadro ao aumentar a incidência de eventos extremos, impondo novos desafios à gestão ambiental e à governança das águas urbanas (Souza, 2020).

Além das intervenções antrópicas, condicionantes naturais também exercem influência significativa sobre a dinâmica hidrológica, especialmente no contexto do Quadrilátero Ferrífero. Nessa região, a presença de vales encaixados e canais pouco profundos favorece a elevação rápida do nível da água e o transbordamento dos cursos d'água durante eventos de precipitação intensa, como observado no Ribeirão Arrudas (Amaral; Costa; Muzzi, 2017). Quando associada à elevada taxa de impermeabilização do solo urbano, essa condição potencializa o escoamento superficial e amplia a frequência de inundações, levando a água a ocupar áreas não previstas para sua circulação natural.

A repetição de episódios de enchentes em cidades como Belo Horizonte evidencia a insuficiência do modelo convencional de drenagem urbana, historicamente estruturado na condução acelerada das águas por meio de galerias subterrâneas e canais artificiais. Frente a esse contexto, cresce o interesse por abordagens que promovam a integração entre processos naturais e planejamento urbano. Nesse cenário, destaca-se o conceito de cidades esponja, que propõe estratégias de manejo hídrico baseadas na infraestrutura verde e na construção de ambientes urbanos mais adaptáveis e resilientes.

O conceito de cidades esponja, inicialmente desenvolvido na China como resposta aos frequentes episódios de inundação em áreas densamente urbanizadas, fundamenta-se na capacidade das cidades de absorver, infiltrar, armazenar e reutilizar a água da chuva por meio da incorporação de soluções baseadas na natureza ao tecido urbano (Zeng et al., 2023; He et al., 2019; Chan et al., 2018).

Nesse contexto, a infraestrutura verde associada aos princípios das cidades esponja assume papel estratégico no planejamento urbano, ao possibilitar a concepção de sistemas urbanos capazes de integrar funções ecológicas, hidrológicas e tecnológicas. A gestão da água deixa de ser tratada apenas como questão setorial e passa a ser compreendida como componente estruturante da infraestrutura urbana, incorporando soluções que promovem infiltração, retenção e monitoramento das águas pluviais. A partir dessa abordagem, torna-se essencial o desenvolvimento de metodologias que articulem dados geoespaciais, modelagem hidrológica e planejamento urbano, permitindo a aplicação de estratégias mais eficientes no contexto de Belo Horizonte e contribuindo para a gestão sustentável e inteligente dos recursos hídricos em áreas urbanizadas.

Estudo de caso

A área de estudo corresponde a um trecho da Avenida Teresa Cristina, na região oeste de Belo Horizonte, reconhecida pela elevada vulnerabilidade ambiental e hidrológica, com recorrentes episódios de inundação identificados pela Carta de Inundações (Belo Horizonte, 2023). Inserido na bacia do Ribeirão Arrudas, esse setor apresenta intensa impermeabilização e condições urbanas que potencializam as cheias durante eventos de chuva intensa. Diante disso, foi selecionado como recorte estratégico para análise e proposição de intervenções baseadas no conceito de cidades esponja, visando à mitigação dos impactos das águas pluviais e à aplicação de estratégias de drenagem urbana sustentável. A Figura 01 ilustra a localização do município de Belo Horizonte e a delimitação da área investigada, destacando sua inserção na bacia hidrográfica do Ribeirão Arrudas e sua conexão com bacias adjacentes, aspecto fundamental para a compreensão da dinâmica hidrológica local e para a orientação de estratégias de drenagem urbana sustentável.

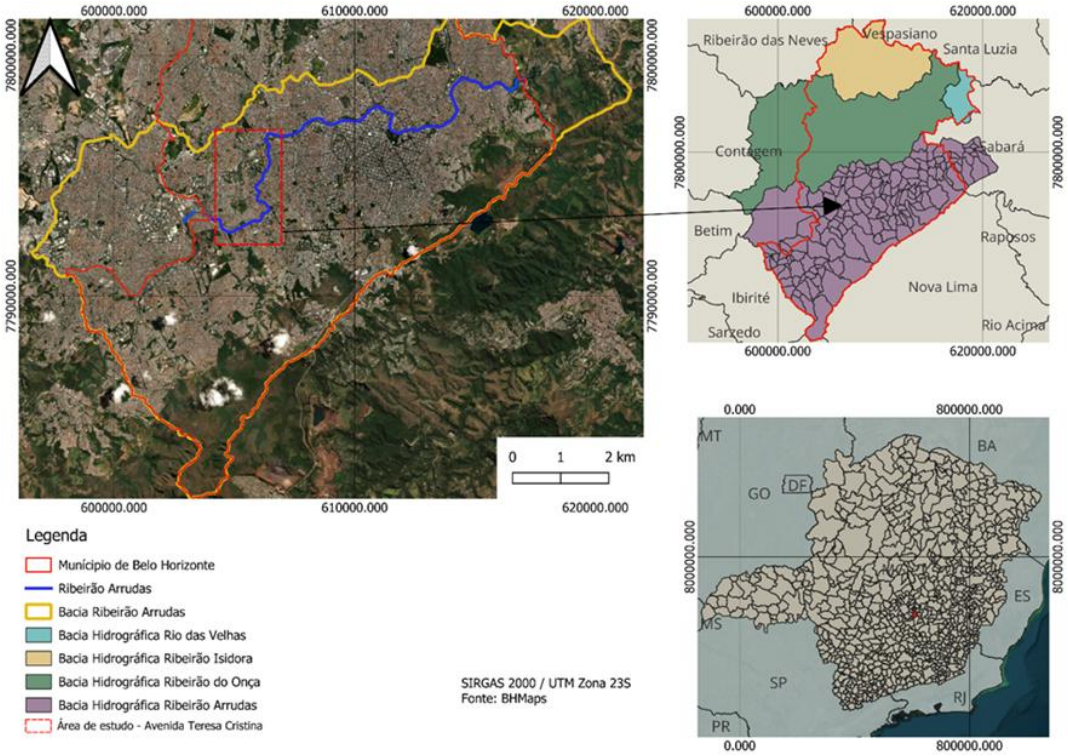


Figura 01: Localização espacial da área de estudo na bacia do Ribeirão Arrudas, em Belo Horizonte – Minas Gerais. Fonte: Autora (2026).

Material e Métodos

A pesquisa foi desenvolvida a partir de uma abordagem quali-quantitativa, estruturada em etapas complementares que integraram revisão teórica, análise espacial e modelagem hidrodinâmica aplicada a um estudo de caso urbano. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre drenagem urbana, hidrologia aplicada, infraestrutura verde e soluções baseadas na natureza, com ênfase no conceito de cidades esponja, visando consolidar o referencial teórico e identificar diretrizes aplicáveis ao contexto urbano brasileiro.

Na sequência, definiu-se como área de estudo o trecho do Ribeirão Arrudas ao longo da Avenida Teresa Cristina, em Belo Horizonte, selecionado em função da recorrência de eventos de inundação e de sua relevância no sistema de drenagem urbana local. A análise espacial foi conduzida em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), a partir de dados georreferenciados relacionados à topografia, ao uso e ocupação do solo e à rede hidrográfica, permitindo a caracterização das condições físicas e urbanas da área.

Complementarmente, foram realizadas simulações hidrodinâmicas por meio do software HEC-RAS, desenvolvido pelo United States Army Corps of Engineers (USACE), utilizado para modelagem do escoamento em canais naturais e artificiais. As simulações possibilitaram representar o comportamento hidráulico do trecho estudado, identificar áreas suscetíveis à inundação e analisar diferentes cenários de intervenção, considerando parâmetros como rugosidade de Manning, vazão e características do relevo (USACE, 2025). Com base nos resultados obtidos, foram elaboradas propostas de intervenção fundamentadas no conceito de cidades esponja, voltadas à mitigação de enchentes e à melhoria da gestão das águas pluviais em ambiente urbano.

Cidades Esponjas e Infraestrutura Verde

O conceito de cidades esponja surge como resposta à crescente vulnerabilidade urbana diante de eventos climáticos extremos, propondo uma abordagem integrada de gestão das águas pluviais baseada na capacidade de absorção, retenção e armazenamento da água no ambiente urbano (Asian Development Bank, 2022). Diferentemente dos modelos convencionais, esse conceito busca restabelecer processos naturais do ciclo hidrológico, favorecendo a infiltração, o armazenamento e o reaproveitamento da água da chuva (Yin et al., 2021).

Nesse contexto, a hidrologia desempenha papel fundamental ao analisar a dinâmica da água em seus diferentes estados e interações com o meio físico e biológico, contribuindo para o entendimento dos processos que influenciam as enchentes urbanas (Castagna, 2023; Vilella e Mattos, 1975). Em áreas urbanizadas, a predominância de superfícies impermeáveis compromete a infiltração e intensifica o escoamento superficial, sobrecarregando os sistemas de drenagem e aumentando a frequência de inundações. Assim, a compreensão do ciclo hidrológico é essencial para subsidiar estratégias mais eficientes de gestão das águas urbanas (Vestena, 2008).

A Figura 02, apresentada por Castagna (2023), representa um modelo urbano baseado na renaturalização dos cursos d'água e na incorporação de infraestrutura verde, em consonância com o conceito de cidades esponja. Nesse contexto, soluções como telhados verdes, pavimentos permeáveis, jardins de chuva e parques alagáveis são integradas ao espaço urbano com o objetivo de aumentar a infiltração, retenção e reaproveitamento das águas pluviais, contribuindo para a redução do escoamento superficial e dos impactos das chuvas intensas. Essas estratégias favorecem a integração entre natureza e cidade por meio de espaços multifuncionais, promovendo a reinserção dos cursos d'água no tecido urbano e a transição de sistemas convencionais para modelos baseados em infraestrutura verde e azul como destacam Cormier e Pellegrino (2008), o que contribui para o restabelecimento do ciclo hidrológico e a melhoria da qualidade ambiental urbana.

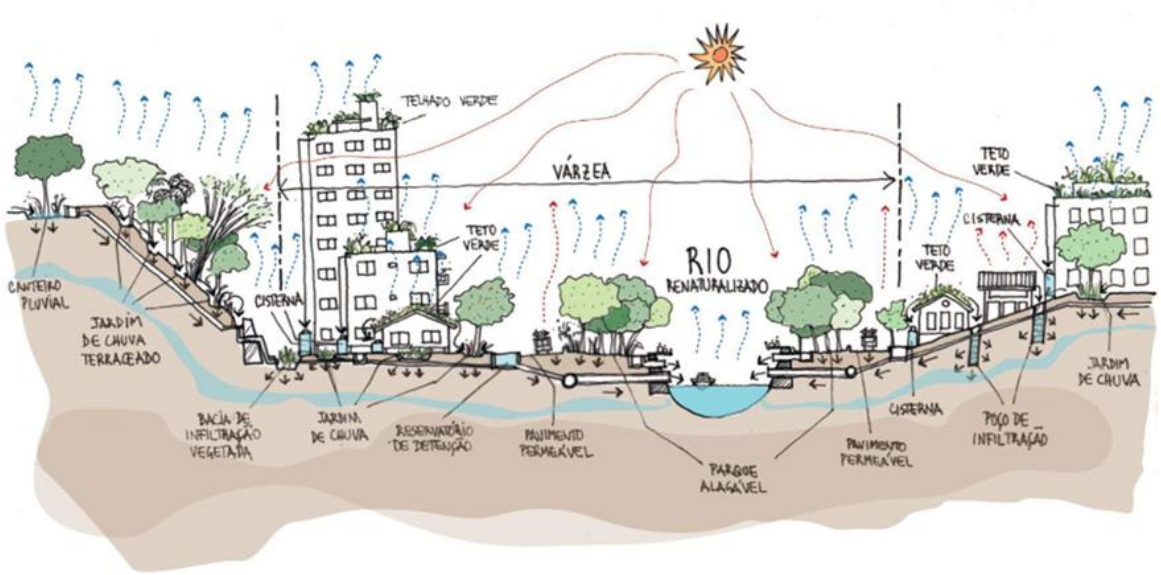


Figura 02: Representação de modelo urbano orientado pela infraestrutura verde e pela renaturalização dos sistemas fluviais. Fonte: Castagna (2023).

A abordagem teórica deste estudo aprofunda o conceito de cidades esponja, destacando a incorporação de soluções baseadas na natureza em diferentes escalas urbanas. Entre as principais estratégias estão áreas úmidas, corredores verdes, parques, arborização, jardins de chuva, telhados verdes, pavimentos permeáveis e biovaletas, que contribuem para reorganizar o espaço urbano e integrar os sistemas naturais ao ambiente construído (Souza, 2025). De acordo com Yin et al. (2021), esse modelo propõe a substituição de infraestruturas convencionais impermeáveis por soluções que favorecem a infiltração, retenção e tratamento das águas pluviais, reduzindo o escoamento superficial e aumentando a eficiência da drenagem. A Figura 03 ilustra essa transição, evidenciando a diferença entre o modelo tradicional e aquele baseado em infraestrutura verde, com maior capacidade de retenção hídrica e melhoria da qualidade ambiental urbana.

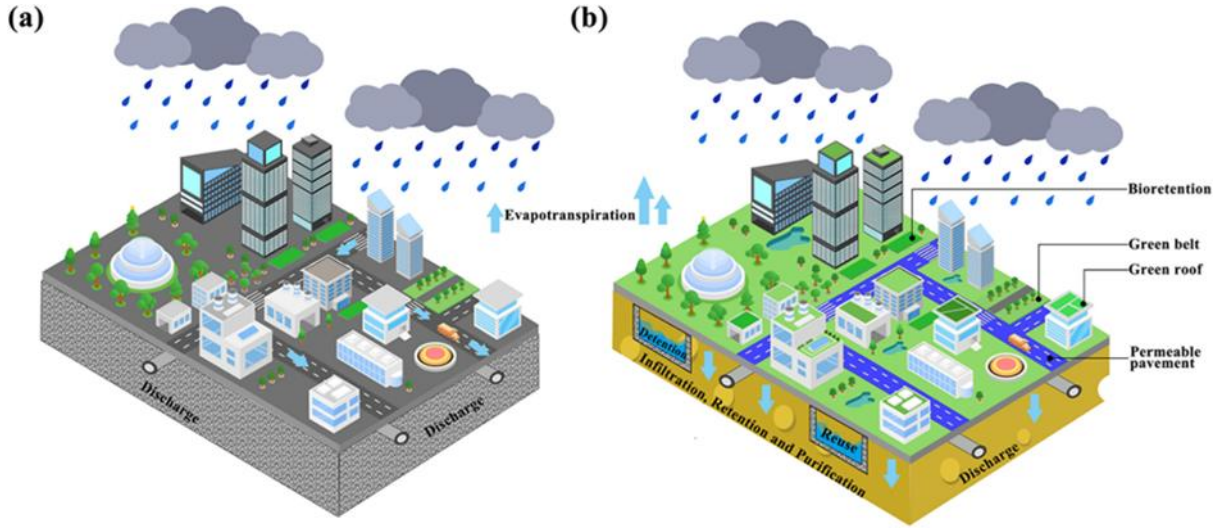


Figura 03: Representação comparativa entre infraestrutura cinza e sistemas urbanos baseados em infraestrutura verde.
Fonte: Yin et al (2021).

Essas soluções reduzem a pressão sobre os sistemas tradicionais de drenagem e contribuem para a melhoria da qualidade ambiental urbana (Souza, 2025). Além de sua função hidrológica, também qualificam os espaços públicos, promovendo ambientes mais sustentáveis e resilientes. Com base no referencial teórico e nas análises espaciais realizadas, torna-se possível apresentar e discutir os resultados, orientando propostas de intervenção voltadas à gestão das águas urbanas.

Análise Integrada das Inundações Urbanas no Ribeirão Arrudas, Belo Horizonte

O Ribeirão Arrudas integra a bacia do rio das Velhas, pertencente ao sistema hidrográfico do rio São Francisco, com aproximadamente 44 km de extensão. Sua nascente localiza-se em Contagem, atravessando o município de Belo Horizonte no sentido sudoeste–leste até desaguar em Sabará (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, 2016; Belo Horizonte, 2022). A bacia hidrográfica associada possui cerca de 228,37 km² e apresenta conexão com as bacias dos ribeirões do Onça e Isidoro, configurando um sistema hídrico interdependente. As características geomorfológicas da região, com altitudes variando entre 750 e 1.500 metros, favorecem o escoamento superficial rápido, sobretudo em períodos de precipitação intensa (Costa et al., 2009).

Neste contexto, a pesquisa concentra-se na análise de um trecho do Ribeirão Arrudas ao longo da Avenida Teresa Cristina, na região oeste de Belo Horizonte, área marcada por elevada urbanização, intensa impermeabilização do solo e recorrência de eventos de inundação. O curso d'água encontra-se canalizado e inserido em uma infraestrutura rígida, refletindo processos históricos de retificação e modificação do sistema natural. A Figura 04 apresenta a delimitação da área de estudo, compreendida entre o Anel Rodoviário e a Avenida Presidente Juscelino Kubitschek, evidenciando sua relevância para a compreensão das interações entre urbanização e dinâmica hidrológica.

A metodologia adotada integra análise espacial e modelagem hidrodinâmica, com base em dados geoespaciais, incluindo o Modelo Digital do Terreno (MDT), que representa a superfície terrestre considerando exclusivamente as variações do relevo (Felgueiras, 1999), disponibilizado pela Prefeitura de Belo Horizonte (Belo Horizonte, 2026). Esses dados foram utilizados para caracterizar as condições físicas da área e subsidiar as simulações do escoamento. A modelagem hidrodinâmica, compreendida como a simulação do comportamento da água em movimento a partir de variáveis como vazão, velocidade e nível d'água (Chow, 1988; Tucci, 2009), foi realizada com o software HEC-RAS, desenvolvido pelo United States Army Corps of Engineers (USACE, 2025). Essa etapa permitiu identificar áreas suscetíveis à inundação e avaliar o comportamento hidráulico do sistema, fornecendo subsídios para a proposição de estratégias de intervenção alinhadas ao conceito de cidades esponja.

As simulações hidrodinâmicas realizadas no HEC-RAS permitiram representar com maior precisão a topografia urbana e o comportamento do escoamento no trecho do Ribeirão Arrudas, possibilitando a análise da propagação das manchas de inundação e da influência das características físicas do terreno na dinâmica das cheias em áreas densamente urbanizadas. A incorporação de dados de uso e ocupação do solo foi fundamental para a definição de parâmetros hidráulicos, como o coeficiente

de rugosidade de Manning, que representa a resistência ao escoamento em canais naturais e artificiais (Chow, 1959; Tucci, 2009). Áreas altamente impermeabilizadas apresentaram maior velocidade de escoamento, enquanto superfícies vegetadas contribuíram para maior retenção e dissipação da água.

Com base no Modelo Digital do Terreno da Prodabel, os resultados evidenciaram ampla expansão das áreas inundáveis ao longo do Ribeirão Arrudas, especialmente nas margens da Avenida Teresa Cristina (Figura 04), com maior criticidade em trechos de canal aberto e regiões densamente urbanizadas, como os bairros Gameleira e Padre Eustáquio. Pontos associados a cruzamentos viários e confluência de afluentes também apresentaram maior vulnerabilidade. Esses achados reforçam a relação entre uso do solo, relevo e dinâmica hidrológica, além de evidenciar a importância de dados altimétricos de alta resolução para análises mais precisas de inundações urbanas.

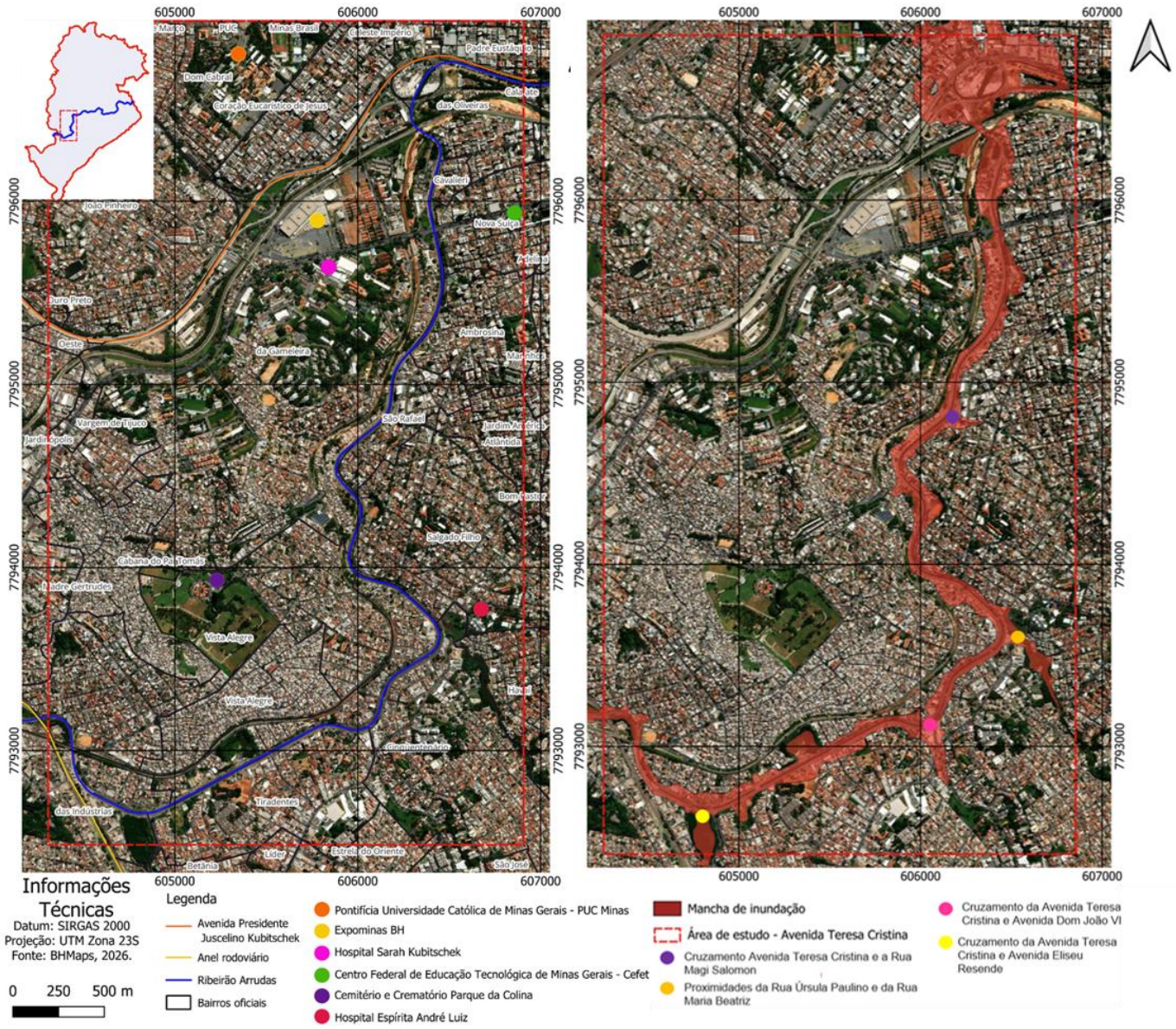


Figura 04: Localização espacial da área de estudo (primeira) e mapeamento das áreas suscetíveis à inundação no Ribeirão Arrudas, a partir de modelagem hidrodinâmica com MDT da Prodabel (segunda).
Fonte: Autora (2026).

Os resultados obtidos ampliam o entendimento da dinâmica hidrológica urbana no Ribeirão Arrudas e fornecem suporte técnico para a proposição de intervenções baseadas em soluções fundamentadas na natureza. A partir dessas análises, são apresentadas a simulação e o mapeamento de estratégias alinhadas ao conceito de cidades esponja no trecho estudado.

Resultados e Discussão

A análise espacial identificou extensas áreas impermeabilizadas ao longo do Ribeirão Arrudas, sobretudo em regiões com predominância de infraestrutura viária e ocupação urbana intensiva, o que contribui para o aumento do escoamento

superficial em eventos de chuva intensa. As simulações hidrodinâmicas permitiram delimitar áreas críticas de inundação, evidenciando a necessidade de estratégias voltadas à redução do volume e da velocidade do escoamento. A partir desses resultados, foram definidas áreas prioritárias para implantação de infraestrutura verde, destacando-se a proposta de um parque esponja alagável ao longo do curso d'água.

A proposta integra soluções como jardins de chuva, pavimentos permeáveis e áreas vegetadas, estruturando um sistema de retenção e infiltração das águas pluviais, contribuindo para a redução dos riscos de inundação e para a melhoria da resiliência hídrica da bacia. Esse parque multifuncional atuaria como área de retenção temporária durante eventos extremos, além de reduzir a sobrecarga do sistema de drenagem convencional. Os mapas apresentados (Figura 05) sintetizam essa proposta, que inclui a renaturalização do Ribeirão Arrudas por meio da recuperação de meandros e planícies alagáveis, associada à revegetação das margens e à implantação de dispositivos de drenagem sustentável. Esse conjunto de intervenções favorece a redução do escoamento superficial, a melhoria do microclima urbano e a requalificação ambiental da paisagem, promovendo a reconexão entre o ribeirão e o tecido urbano.

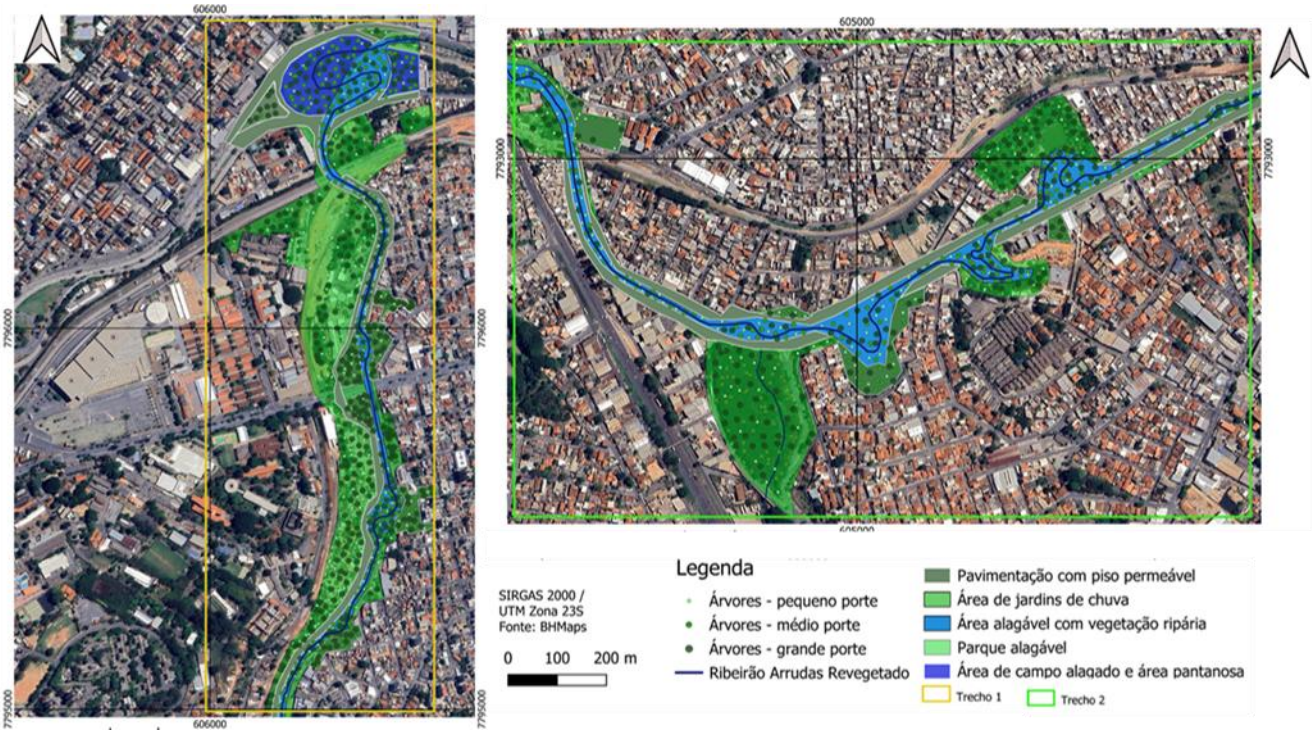


Figura 05: Proposta de parque alagável estruturado por estratégias de cidade esponja.
Fonte: Autora (2026).

A Figura 06 apresentam a proposta do parque esponja alagável, evidenciando a integração entre processos hidrológicos, vegetação e organização dos espaços livres. A configuração inclui áreas alagáveis, zonas úmidas e revegetação do Ribeirão Arrudas, formando um sistema que favorece a infiltração, retenção e redistribuição das águas pluviais, além de contribuir para a melhoria da qualidade ambiental urbana.

A vegetação foi distribuída com base em critérios ecológicos, com espécies de pequeno e médio porte em áreas de circulação e transição, auxiliando no conforto térmico e na infiltração, enquanto árvores de grande porte foram direcionadas às áreas mais suscetíveis à inundação. Essas contribuem para a interceptação da chuva, estabilização do solo e consolidação do parque como elemento estruturador da infraestrutura verde.

A proposta reconfigura o Ribeirão Arrudas como um eixo ambiental estruturador, por meio da renaturalização do curso d'água, com recuperação de meandros e incorporação de planícies de inundação. A revegetação das margens com espécies nativas contribui para o aumento da biodiversidade, melhoria da permeabilidade do solo e maior estabilidade ambiental. Integradas a esse processo, soluções de infraestrutura verde favorecem o manejo sustentável das águas pluviais, reduzindo o escoamento superficial e ampliando a resiliência hídrica.

Nesse contexto, o parque esponja alagável consolida-se como estratégia de requalificação ambiental, ao articular funções ecológicas e hidrológicas em um sistema integrado. A adoção de estruturas adaptativas, como passarelas elevadas, permite a convivência segura com as dinâmicas naturais da água, transformando áreas suscetíveis a inundações em espaços resilientes e ambientalmente qualificados.

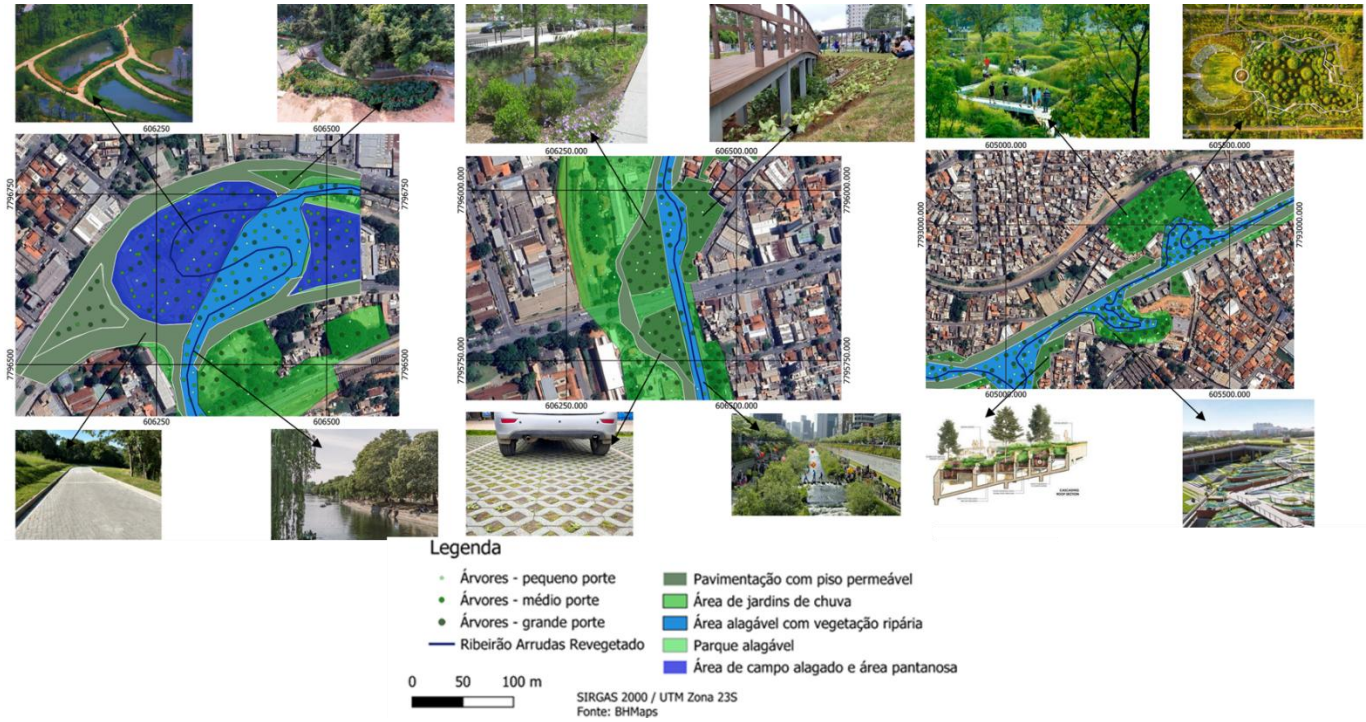


Figura 06: Recorte ampliado da proposta de parque alagável e infraestrutura verde no Trecho 1 e 2.
Fonte: Autora (2026).

Para avaliar os efeitos ambientais da proposta de intervenção no Ribeirão Arrudas, foi realizada uma análise comparativa entre o cenário atual e o projetado, com base em indicadores hidrológicos e espaciais (Tabela 1). Os dados resultam da integração de simulações hidrodinâmicas no HEC-RAS com o Modelo Digital do Terreno disponibilizado pela Prefeitura de Belo Horizonte, associadas a análises em Sistema de Informação Geográfica (SIG), incluindo informações de uso e ocupação do solo. Essa abordagem permitiu quantificar alterações no escoamento superficial, na extensão das áreas inundáveis e na distribuição de superfícies permeáveis, evidenciando o desempenho ambiental das soluções baseadas na natureza na melhoria da gestão das águas urbanas.

Parâmetro	Cenário Atual	Cenário Proposto	Variação (%)
Área total inundada (ha)	42,5	28,3	-33,4%
Área inundada – alta profundidade (m²)	185.000	102.000	-44,9%
Área inundada – baixa profundidade (m²)	240.000	180.000	-25,0%
Área permeável (%)	18%	42%	+133,3%
Área impermeável (%)	82%	58%	-29,3%
Área de infraestrutura verde (m²)	35.000	120.000	+242,8%
Extensão de curso naturalizado (m)	0	3.200	—
Velocidade média do escoamento (m/s)	2,1	1,4	-33,3%
Tempo de concentração (min)	18	27	+50,0%

Tabela 01: Comparação dos cenários hidrológicos e espaciais (valores estimados)
Fonte: Autora (2026).

Considerações Finais

Os resultados demonstram que a mitigação de enchentes urbanas requer a superação do modelo tradicional de drenagem, incorporando estratégias ambientais integradas. As soluções baseadas na natureza apresentam elevado potencial para reduzir riscos hidrológicos, restaurar o ciclo da água e promover maior resiliência urbana.

No caso do Ribeirão Arrudas, a implementação de infraestrutura verde ao longo do curso d'água configura uma estratégia eficaz para reduzir impactos das enchentes e requalificar a paisagem urbana.

Destaca-se, portanto, a importância da integração entre engenharia ambiental, planejamento urbano e arquitetura da paisagem na construção de cidades mais sustentáveis e adaptadas às mudanças climáticas.

Agradecimentos

Ao apoio financeiro recebido do CAPES.

Referências Bibliográficas

AMARAL, Rubens; COSTA, Stael de Alvarenga Pereira; MUZZI, Maria Rita Scotti. O sequestro de carbono em trechos da floresta urbana de Belo Horizonte: por um sistema de espaços livres mais eficiente no provimento de serviços ecossistêmicos urbanos. Paisagem e Ambiente, São Paulo, Brasil, 2017.

ASIAN DEVELOPMENT BANK (ADB). Sponge Cities: Integrating Green and Gray Infrastructure to Build Climate Change Resilience in the People's Republic of China. Manila: Asian Development Bank, 2022.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. Técnicas compensatórias em drenagem urbana. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.

BELO HORIZONTE (MG). Prefeitura Municipal. Carta de Inundações de Belo Horizonte. Belo Horizonte: Prefeitura de Belo Horizonte, 2023.

BELO HORIZONTE (MG). Prefeitura Municipal. BHGEO: Infraestrutura de Dados Espaciais de Belo Horizonte. Belo Horizonte: Prefeitura de Belo Horizonte, 2026.

BELO HORIZONTE (MG). Prefeitura Municipal. Dados territoriais e ambientais do município de Belo Horizonte. Belo Horizonte: Prefeitura de Belo Horizonte, 2022.

BORSAGLI, Alessandro. Do convívio à ruptura: a cartografia na análise histórico pluvial de Belo Horizonte (1894-1977). 2019. 224f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

CANHOLI, Aluísio Pardo. Drenagem urbana e controle de enchentes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CARNEIRO, Vandervilson Alves et al. Eventos extremos e impactos urbanos. Revista Territorial, 2026.

CASTAGNA, Guilherme. Guia prático de jardins de chuva para cidades. SOS Mata Atlântica, Instituto Nova Água. 2023.

CHAN, F. K. S.; JIANG, C.; MAN, K. "Sponge city" in China—a breakthrough of planning and flood risk management in the urban context. Land Use Policy, 2018.

CHOW, V. T. Open-channel hydraulics. New York: McGraw-Hill, 1959.

CHOW, V. T. Applied hydrology. New York: McGraw-Hill, 1988.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS. Plano diretor de recursos hídricos da bacia do rio das Velhas. Belo Horizonte: CBH Rio das Velhas, 2016.

CORMIER, Nathaniel S.; PELLEGRINO, Paulo Renato Mesquita. Infra-estrutura verde: uma estratégia paisagística para a água urbana. Paisagem e Ambiente, São Paulo, Brasil, 2008.

COSTA, Mateus Oliveira; RODRIGUES, Camila Ribeiro. Impacto das mudanças climáticas na drenagem urbana. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2025. Disponível em: https://www.revista.unipacto.com.br/index.php/multidisciplinar/article/view/4062. Acesso em: 10 ago. 2025.

COSTA, Staël de Alvarenga Pereira et al. Laboratório da Paisagem. Os sistemas de espaços livres e a constituição da esfera pública contemporânea: estudos de caso em metrópoles-cidades e novas territorialidades urbanas brasileiras – Núcleo Belo Horizonte. 2009. Relatório final de pesquisa financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura, 2009. Disponível em: acervo institucional da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais. Acesso em: 17 dez. 2025.

FELGUEIRAS, Carlos Alberto. Análises sobre modelos digitais de terreno em ambiente de sistemas de informações geográficas. São José dos Campos: DPI/INPE, 1999.

HE, Bao-Jie. et al. Co-benefits approach: Opportunities for implementing sponge city and urban heat island mitigation. Land Use Policy, 2019.

MORAIS, Bárbara Roberta. Uso de técnicas de modelagem e análise espacial para avaliação do potencial de aplicação de

infraestruturas verdes: estudo de caso da bacia hidrográfica do Córrego da Ressaca. 2022. 106 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

SALES, Eduardo Henrique Souza et al. Análise espacial das áreas verdes de Belo Horizonte e sua relação com a qualidade de vida. Revista Contemporânea, 2025.

SOUZA, Talita Silvia de. Estudo de Tecnologias em Sponge City para Drenagem da Água Pluvial: Aplicação no Rio Arrudas em BH. 78fl. 2020. Monografia (Programa de Especialização em Sistemas tecnológicos e Sustentabilidade Aplicados ao Ambiente Construído), Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

SOUZA, T. S. de; COSTA, S. de Alvarenga Pereira; GIMMLER NETTO, M. M. Cidades esponjas: aplicabilidade de soluções sustentáveis no Ribeirão Arrudas, em Belo Horizonte-MG. Desafios – Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2025.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Gestão de águas pluviais urbanas. Brasília: Ministério das Cidades, 2008.

USACE-US Army Corps of Engineers. HEC-ResSim User's Manual Version 3.5. Davis, CA: US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. 2025.

VESTENA, Leandro Redin. A importância da hidrologia na prevenção e mitigação de desastres naturais. 2008. Revista Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais, 2008.

VILLELA, Swami M. Marcondes; MATTOS, Arthur. Hidrologia aplicada. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.

YIN, Dingkun. et al. Sponge city practice in China: A review of construction, assessment, operational and maintenance. Science Direct, 17 fl. 2021.

ZENG, Liyun; ZENG, Huiling; SONG, Lingxi. Perception of sponge city for achieving circularity goal and hedge against climate change: a study on Weibo. Preprints / vLex International Law, 2023.

URBANIZAÇÃO, IMPACTOS AMBIENTAIS E SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA EM GUARATIBA (RJ): UMA ANÁLISE INTREGADA (1985-2024)

1 Carlos Eduardo Berto Guedes, 2 Lorenna Araujo Lima Almeida, 3 Gabriel Paes da Silva Sales
1 Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, e-mail: ceb.guedes@gmail.com;2 Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, e-mail: lorennalalmeida@gmail.com; 3 Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, e-mail: gabrielsales@puc-rio.br

Palavras-chave: Serviços Ecossistêmicos; Uso e Cobertura da Terra; Ecologia Urbana.

Resumo

O artigo analisa o processo de transformação territorial em Guaratiba, no município do Rio de Janeiro, no período de 1985 a 2024, com foco na dinâmica de uso e cobertura da terra e suas implicações ambientais e urbanas. A metodologia baseia-se na análise temporal de dados geoespaciais da plataforma MapBiomas (Coleção 10), considerando intervalos decenais para identificar padrões de mudança na paisagem. Os resultados indicam um processo acelerado de urbanização, cuja participação passou de 5,8% em 1985 para 21% em 2024. Observa-se a expansão contínua das áreas urbanizadas, inicialmente dispersas e posteriormente consolidadas, acompanhada pela conversão de áreas de mosaico de usos e pastagem, além da ocupação de zonas ambientalmente sensíveis. Essa dinâmica resultou na redução da capacidade de regulação hídrica, no aumento da impermeabilização do solo e na maior suscetibilidade a alagamentos e processos de degradação ambiental. Conclui-se que a urbanização em Guaratiba ocorreu de forma acelerada e, em grande medida, dissociada das limitações ecológicas do território, evidenciando a necessidade de estratégias integradas de planejamento urbano e ambiental voltadas à preservação dos remanescentes naturais e à recuperação das funções ecossistêmicas. Nesse contexto, destaca-se a necessidade urgente de adoção de soluções baseadas na natureza como abordagem estratégica para promover a resiliência urbana e um acesso mais justo e equitativo aos benefícios oferecidos pela natureza.

Introdução

O crescimento acelerado e frequentemente desordenado das cidades tem contribuído para o agravamento de problemas ambientais urbanos, incluindo mudanças climáticas, ilhas de calor, enchentes e deslizamentos, dentre outros. Esse cenário não é local, pelo contrário, trata-se de uma tendência global e estima-se que 68% da população mundial habitará ambientes urbanizados até 2050 (Nações Unidas, 2018; Wilkes-Allemann et al., 2023). Tal tendência também é verificada para o Brasil, visto que hoje cerca de 87% da população brasileira vive em áreas urbanas, o que significa um aumento aos cerca de 84% verificados em 2010 (IBGE, 2022; BRASIL, 2025). De certa forma, o mesmo cenário pode ser observado para a cidade do Rio de Janeiro, visto que passou por um intenso processo de mudança de perfil do uso da terra nos últimos 40 anos, com um aumento da área urbanizada (MAPBIOMAS, 2026). Nesse sentido, observa-se que a expansão urbana da cidade do Rio de Janeiro tem se direcionado, prioritariamente, para a Zona Oeste, com a consequente intensificação de impactos socioambientais.

Cabe destacar, portanto, que a Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro é marcada por uma profusão de florestas, especialmente situadas no Parque Estadual da Pedra Branca, bem como manguezais, restingas e outros ecossistemas. De maneira particular, os manguezais de Guaratiba configuram-se como um dos mais relevantes remanescentes desse ecossistema na cidade, desempenhando funções ecológicas e ambientais essenciais. Sua estrutura e distribuição estão fortemente condicionadas por gradientes ambientais, especialmente pela salinidade da água intersticial e pela frequência de inundação, o que influencia diretamente o porte da vegetação, a densidade de indivíduos e a dominância de espécies ao longo da planície costeira (Schaeffer-Novelli, 1995). Esses ecossistemas atuam como importantes reguladores naturais, promovendo a dissipação da energia das marés, a retenção de sedimentos, a filtragem de poluentes e a manutenção da biodiversidade, além de exercerem papel estratégico na proteção costeira e na regulação hídrica (Barbier, 2011).

Sob a perspectiva da engenharia ambiental e sanitária, tais ambientes podem ser compreendidos como infraestrutura natural, fundamental para o funcionamento equilibrado dos sistemas urbanos. O planejamento territorial deve considerar a aptidão ecológica do meio físico, respeitando suas limitações naturais, especialmente em áreas frágeis como planícies alagáveis e zonas costeiras (McHarg, 1969). No entanto, o processo de urbanização observado em Guaratiba nas últimas décadas tem ocorrido, em grande medida, de forma dissociada desses princípios, resultando em impactos, diretos ou não, sobre áreas ambientalmente sensíveis e comprometendo suas funções ecossistêmicas – caso que será analisado neste estudo.

A partir da segunda metade do século XX, intensificando-se nas últimas quatro décadas, Guaratiba passou a experimentar um processo acelerado de transformação em seu território, impulsionado pela expansão urbana, pela valorização imobiliária e pela ocupação periférica, frequentemente associada à informalidade urbana (MAPBIOMAS, 2026). Esse processo pode ser interpretado como a transição de um território dominado pelos “tempos lentos” da natureza para um espaço progressivamente estruturado pelos “tempos rápidos” da urbanização, marcado pela incorporação de objetos técnicos, como infraestrutura viária, parcelamento do solo e redes urbanas, que reconfiguram a organização espacial (Santos, 2006; IBGE, 2013).

Complementarmente, é possível compreender esse fenômeno como parte da lógica de produção do espaço urbano sob a dinâmica do capital, na qual áreas periféricas são incorporadas ao processo de urbanização como novas fronteiras de valorização

imobiliária (Harvey, 2005). Nesse contexto, a expansão urbana em áreas como Guaratiba tende a ocorrer de forma desigual e desordenada, frequentemente direcionada para territórios de menor valor fundiário (Maricato, 2011), mas de elevada fragilidade ambiental, como planícies alagáveis e zonas costeiras.

Do ponto de vista da ecologia da paisagem, esse processo pode resultar na fragmentação da matriz natural, reduzindo a conectividade ecológica e comprometendo a funcionalidade dos ecossistemas (Troll, 1977). A paisagem, anteriormente contínua e, de certa forma, integrada, passa a apresentar um padrão heterogêneo, com fragmentos isolados de vegetação inseridos em uma matriz predominantemente urbanizada, fenômeno que reduz a resiliência ambiental e a capacidade de resposta a perturbações. Nesse sentido, a desconexão entre os processos naturais e a ocupação urbana resulta em uma paisagem que deixa de "funcionar como natureza", tornando-se mais vulnerável a problemas ambientais, como alagamentos, degradação da qualidade da água e perda de biodiversidade (Spirn, 1984, p. 43-68). Esse quadro é particularmente crítico em áreas como Guaratiba, onde a ocupação sobre sistemas naturalmente alagáveis pode comprometer diretamente a capacidade de regulação hídrica do território.

Diante desse contexto, a análise da evolução do uso e cobertura da terra em Guaratiba entre 1985 e 2024 torna-se fundamental para compreender as dinâmicas de transformação territorial e seus impactos ambientais e urbanos. A utilização de séries históricas de dados geoespaciais permite identificar padrões de mudança, quantificar a conversão do solo e avaliar a perda de funções ecossistêmicas ao longo do tempo. Assim, o presente estudo tem como objetivo analisar a dinâmica de uso e cobertura da terra no bairro de Guaratiba no período de 1985 a 2024, evidenciando o processo de urbanização, bem como suas implicações para a regulação hídrica, perda de serviços ecossistêmicos e sustentabilidade ambiental. A partir dessa análise, busca-se contribuir para o debate sobre planejamento urbano e ambiental, destacando a necessidade de integração entre os ecossistemas e as estratégias de ocupação do território.

Materiais e Métodos

O bairro de Guaratiba, localizado na Zona Oeste do município do Rio de Janeiro, constitui um dos principais vetores de expansão urbana da metrópole, destacando-se por sua inserção em uma extensa planície costeira associada à Baía de Sepetiba. Trata-se de um território historicamente marcado pela elevada complexidade geoambiental, caracterizado pela presença de ecossistemas costeiros sensíveis, como manguezais, restingas, apicuns e campos alagáveis, cuja dinâmica é diretamente influenciada por fatores como regime de marés, variações de salinidade, topografia plana e alta conectividade hidrológica.

Do ponto de vista demográfico, os dados evidenciam uma tendência consistente de crescimento populacional. Em 2000, Guaratiba possuía cerca de 101.205 habitantes, número que passou para 123.114 em 2010 e atingiu aproximadamente 176.929 habitantes em 2022 (IBGE, 2000; IBGE, 2010; IBGE, 2022). Esse aumento superior a 75% em pouco mais de duas décadas demonstra não apenas a expansão populacional, mas também a intensificação da ocupação do território. Ainda que mudanças metodológicas e ajustes territoriais promovidos pelo IBGE após 2010 exijam cautela na comparação direta dos dados, a tendência de crescimento acelerado é inequívoca e reconhecida em análises oficiais.

Por sua vez, a área de estudo abriga importantes remanescentes de ecossistemas costeiros, protegidos por unidades de conservação (UC), com destaque para a Reserva Biológica Estadual de Guaratiba, que possui aproximadamente 3.360 hectares, e protege um dos mais relevantes manguezais da Região Metropolitana, desempenhando funções essenciais como regulação hídrica, proteção contra inundações e manutenção da biodiversidade. Cabe destacar, também, o Parque Natural Municipal da Serra da Capoeira Grande e o Parque Estadual da Pedra Branca, além de diferentes Áreas de Proteção Ambiental: APA da Pedra Branca, APA da Serra da Capoeira Grande, APA das Brisas e APA de Sepetiba II (Figura 01).

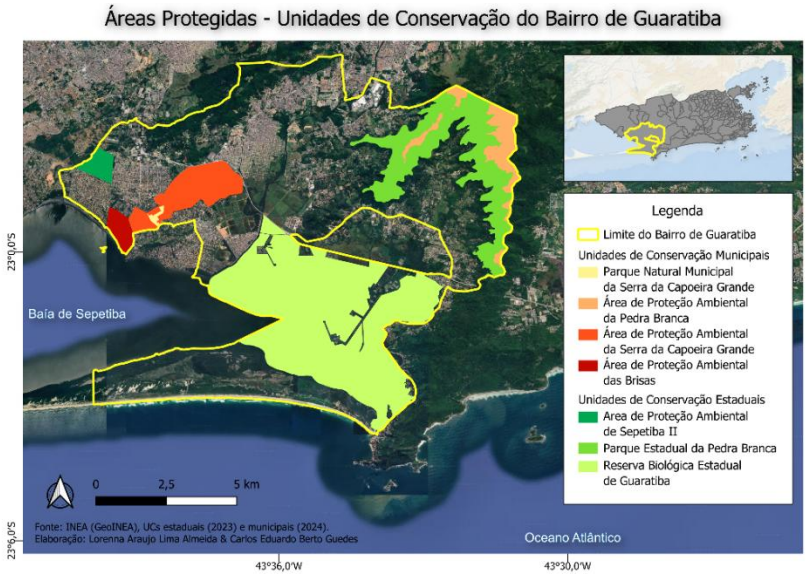


Figura 01: Localidade de Guaratiba no contexto da cidade do Rio de Janeiro, com destaque para suas áreas protegidas. Fonte: INEA (GeoINEA), UCs estaduais (2023) e municipais (2024). Elaborado por Lorenna Araujo Lima Almeida e Carlos Eduardo Berto Guedes.

Destaca-se, ainda, que a presente pesquisa se caracteriza como um estudo de abordagem qualiquantitativa, de natureza aplicada e caráter analítico-descritivo, voltado à avaliação da dinâmica de uso e cobertura da terra no bairro de Guaratiba, Rio de Janeiro/RJ, no período de 1985 a 2024. A base de dados utilizada foi a plataforma MapBiomas (Coleção 10), selecionada por sua consistência metodológica, padronização das classes temáticas e ampla série temporal, permitindo a análise evolutiva da paisagem ao longo de quase quatro décadas. Foram considerados os anos 1985, 1995, 2005, 2015 e 2024, com intervalos decenais, possibilitando a identificação de padrões de transformação territorial. A partir desses dados, foram elaborados mapas temáticos, bem como análises comparativas entre os diferentes períodos.

Complementarmente, foi realizada uma avaliação das implicações ambientais associadas, especialmente no que se refere à perda de funções ecossistêmicas e à regulação hídrica do território. Para isso, foram utilizados indicadores indiretos, como a variação percentual da cobertura natural e a expansão das áreas urbanizadas, permitindo estimar a redução da capacidade de infiltração e retenção de águas pluviais ao longo do tempo. A interpretação dos resultados foi fundamentada em referenciais, principalmente, do planejamento ambiental, possibilitando uma leitura sistêmica das transformações territoriais. Adicionalmente, foram considerados dados secundários da literatura científica sobre os ecossistemas costeiros da região, especialmente manguezais, a fim de contextualizar os impactos observados sobre a dinâmica ambiental local. Para o cálculo do Índice de Regulação Hídrica foi utilizado o seguinte padrão (fórmula com os pesos), de acordo com o portal GeoINEA Municípios (INEA, 2020):

IRH = [(Cobertura Natural × 0,35) + (APPs × 0,30) + (Permeabilidade × 0,20)] – (Pressão Urbana × 0,15).

Resultados e Discussão

Em 1985, o território de Guaratiba configurava-se como uma paisagem de relativa elevada integridade ecológica, na qual predominavam os sistemas naturais sobre as áreas urbanizadas. Cerca de 43% da área era ocupada por formações naturais – incluindo formações florestais, mangues, campos alagados e áreas pantanosas, apicuns, rios, lagos e oceanos e a restinga arbórea. Por sua vez, a área com urbanização consolidada era inferior a 6%, restrita a núcleos isolados e pouco articulados espacialmente (Tabela 01). Essa configuração expressava um território cuja organização estava fortemente condicionada pelos elementos físicos e ecológicos, especialmente pela hidrodinâmica costeira, pelo regime de marés e pela presença de solos hidromórficos, que impõem limitações naturais à ocupação urbana convencional.

A planície costeira de Guaratiba, nesse contexto, funcionava como um sistema ambiental integrado, no qual os compartimentos naturais – manguezais, apicuns, canais estuarinos, áreas alagáveis e remanescentes florestais – mantinham conectividade funcional e estrutural. Essa conectividade garantia o fluxo contínuo de matéria, energia e organismos, sendo essencial para a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Do ponto de vista geomorfológico e hidrológico, tratava-se de um ambiente fortemente influenciado por processos de sedimentação, dinâmica estuarina e variações do nível do mar, fatores que condicionavam diretamente o uso e a ocupação do solo.

Tabela 01: Uso e Ocupação da Terra no território de Guaratiba (1985-2024).
Fonte: MapBiomas (Coleção 10).

Uso e Ocupação da Terra	1985	1995	2005	2015	2024
Uso não Identificado	1,9%	1,9%	1,9%	1,9%	1,9%
Formação Florestal	16,4%	18,0%	19,3%	19,6%	20,1%
Mangue	10,8%	11,7%	12,7%	13,5%	13,4%
Campo Alagado e Área Pantanosa	3,8%	4,0%	4,7%	4,0%	4,6%
Pastagem	3,5%	2,7%	2,8%	3,3%	1,2%
Mosaico de Usos	40,6%	34,9%	27,2%	24,6%	24,1%
Praia, Duna e Areal	0,8%	0,8%	0,7%	0,7%	0,7%
Área Urbanizada	5,8%	9,9%	15,2%	18,9%	21,0%
Outras Áreas não Vegetadas	1,0%	0,3%	0,6%	0,5%	0,3%
Apicum	8,2%	7,8%	7,3%	5,4%	4,2%
Rio, Lago e Oceano	3,1%	2,9%	2,0%	1,9%	2,0%
Restinga Arbórea	4,1%	5,0%	5,7%	5,7%	6,5%

Do ponto de vista funcional, esses ecossistemas atuavam como infraestrutura natural essencial, desempenhando serviços ecossistêmicos fundamentais para o equilíbrio ambiental e a segurança urbana (Schaeffer-Novelli, 1995). As áreas de manguezal e campos alagados exerciam papel determinante na regulação do ciclo hidrológico, promovendo a infiltração de águas pluviais, a retenção de sedimentos, a recarga de aquíferos rasos e a dissipação da energia das marés, além de funcionarem como zonas naturais de amortecimento de cheias. Essa função é particularmente relevante em áreas de baixa altitude, como Guaratiba, onde o risco de inundação é naturalmente elevado.

Além disso, cabe reforçar o papel fundamental que os manguezais desempenham para a manutenção da qualidade da água, atuando como filtros biogeoquímicos capazes de reter nutrientes, poluentes e matéria orgânica. Esse processo contribui diretamente para a melhoria da qualidade dos corpos hídricos associados, reduzindo a carga poluente que atinge a Baía de Sepetiba. Conforme evidenciado por Soares et al. (2017), os manguezais da região apresentam elevada variabilidade estrutural, condicionada principalmente por gradientes de salinidade da água intersticial e pela frequência de inundação, o que influencia diretamente a distribuição das espécies, o porte da vegetação e a densidade de indivíduos ao longo da planície costeira. Essa

característica reforça a sensibilidade desses ecossistemas a alterações ambientais, especialmente aquelas relacionadas à modificação do regime hidrológico e à ocupação do solo. Destaca-se, portanto, que embora a área de mangue não tenha sido reduzida, por outro lado, a área urbanizada praticamente quadruplicou, aumentando de 5,8%, em 1985, para 21%, em 2024. Além disso, nesse período outra mudança marcante foi a redução da área classificada como "Mosaico de Usos", que foi de 40,6% para 24,1% - "Apicum" e "Rio, Lago e Oceano" também sofreram reduções, mesmo que numa escala menor (Figura 02).

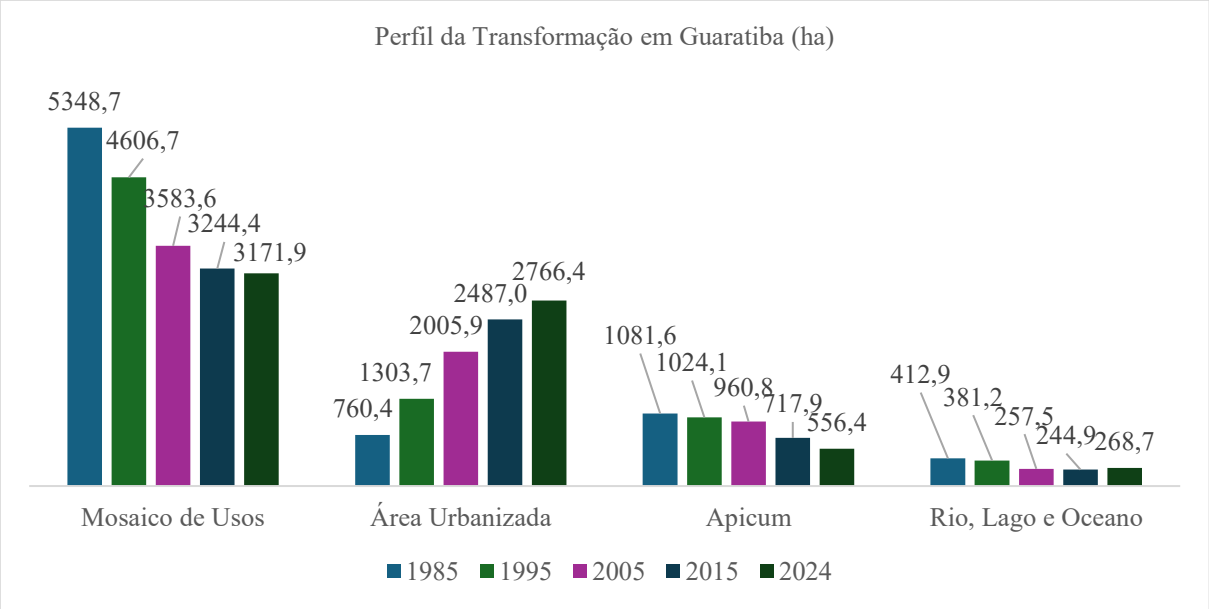


Figura 02: Perfil de Transformação do Uso e Ocupação da Terra em Guaratiba (1985-2024). Fonte: MapBiomas (Coleção 10).

Em 1985, é possível sugerir que o território ainda não havia sido intensamente apropriado por objetos técnicos – como infraestrutura viária estruturante, sistemas de drenagem artificial, redes de saneamento ou parcelamentos urbanos extensivos – mantendo-se subordinado às condicionantes naturais. Essa condição revela um espaço ainda pouco artificializado, no qual os processos naturais exerciam papel estruturante na organização territorial e na definição dos usos possíveis do solo (Santos, 2006). Complementarmente, a abordagem de McHarg (1969), baseada no planejamento ecológico, permite interpretar Guaratiba, em 1985, como um território que ainda apresentava relativa compatibilidade entre uso do solo e aptidão ambiental. Segundo o autor, áreas ambientalmente frágeis – como planícies alagáveis, zonas estuarinas e ambientes costeiros – devem ser preservadas ou utilizadas de forma compatível com suas limitações ecológicas, evitando intervenções que comprometam suas funções naturais. Nesse sentido, a baixa ocupação observada no período indica que o território ainda não havia sido submetido de forma significativa às pressões da urbanização, mantendo um equilíbrio relativo entre sociedade e natureza – podendo ser compreendido como um território com características mais rurais

Sob a ótica da engenharia sanitária, essa configuração apresentava vantagens significativas, uma vez que os sistemas naturais desempenhavam funções que, em ambientes urbanizados, demandariam soluções de engenharia complexas e onerosas. A presença de áreas permeáveis, zonas de inundação natural e sistemas vegetados contribui para a regulação do escoamento superficial, reduzindo a necessidade de sistemas artificiais de drenagem e minimizando riscos associados a enchentes e alagamentos. Além disso, a baixa densidade de ocupação implicava menor geração de efluentes e resíduos, reduzindo a pressão sobre os sistemas ambientais.

Dessa forma, o cenário de 1985 pode ser caracterizado como um momento no qual Guaratiba apresentava baixa urbanização. No entanto, essa condição também representava uma fase de vulnerabilidade potencial frente à expansão urbana, uma vez que a ausência de planejamento territorial estruturado poderia levar à ocupação de áreas inadequadas sob o ponto de vista ambiental. Assim, o que se observa é um território com elevada capacidade ambiental, mas que, nas décadas subsequentes, seria progressivamente tensionado pelo avanço da urbanização, pela intensificação dos usos antrópicos e pela crescente desconexão entre os processos naturais e a ocupação do solo (Figura 03).

A evolução do uso e cobertura da terra em Guaratiba entre 1985 e 2024 revela, de forma inequívoca, um processo intenso, contínuo e estrutural de transformação territorial. Essa transição não se limita a uma simples mudança de uso do solo, mas expressa uma reconfiguração profunda das relações entre sociedade e natureza, na qual os processos ecológicos passam a ser gradativamente subordinados à lógica de produção do espaço urbano (Figura 03). Percebe-se, portanto, que a expansão urbana do bairro se deu, prioritariamente, em sua parte mais central, onde áreas classificadas como "Pastagem" e "Mosaico de Usos" foram gradativamente transformadas em "Área Urbanizada" consolidada. Evidentemente, tal ação impacta, de forma direta ou indireta, todos os ecossistemas existentes. Destaca-se, ainda, o papel importante desempenhado pelas unidades de conservação existentes, visto que protegeram áreas florestadas e ecossistemas associados da Mata Atlântica. Mesmo assim, entre 1985 e 2024

houve conversão em “Área Urbanizada” de “Campo Alagado e Área Pantanosa” (0,6%), “Apicum” (0,3%), “Restinga Arbórea” (0,2%), “Formação Florestal” (0,1%) e “Rio, Lago e Oceano” (0,1%).

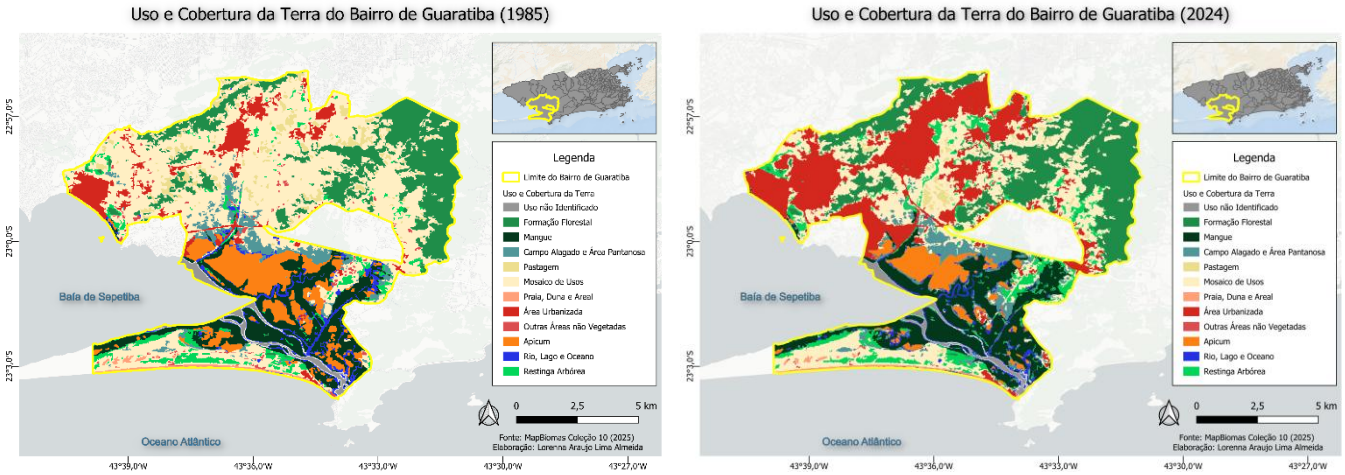


Figura 03: Perfil de Transformação de Usos de Solo de Guaratiba (1985-2024).
Fonte: MapBiomas (Coleção 10).

Nesse contexto, a perda de funções ecossistêmicas – especialmente a regulação hídrica – emerge como um dos aspectos mais críticos dessa transformação. A substituição de superfícies permeáveis por áreas impermeabilizadas, associada à ocupação de planícies alagáveis e zonas de drenagem natural, resulta em alterações substanciais no balanço hidrológico local. Observa-se, portanto, o aumento do escoamento superficial, a redução da infiltração e da recarga de aquíferos, bem como a intensificação de eventos de alagamento, que passam a ocorrer com maior frequência e severidade. Esse processo evidencia uma clara desconexão entre a dinâmica de urbanização e a capacidade de suporte do meio físico, na medida em que o território deixa de operar segundo sua lógica natural e passa a responder de forma disfuncional às intervenções antrópicas (Figura 04).

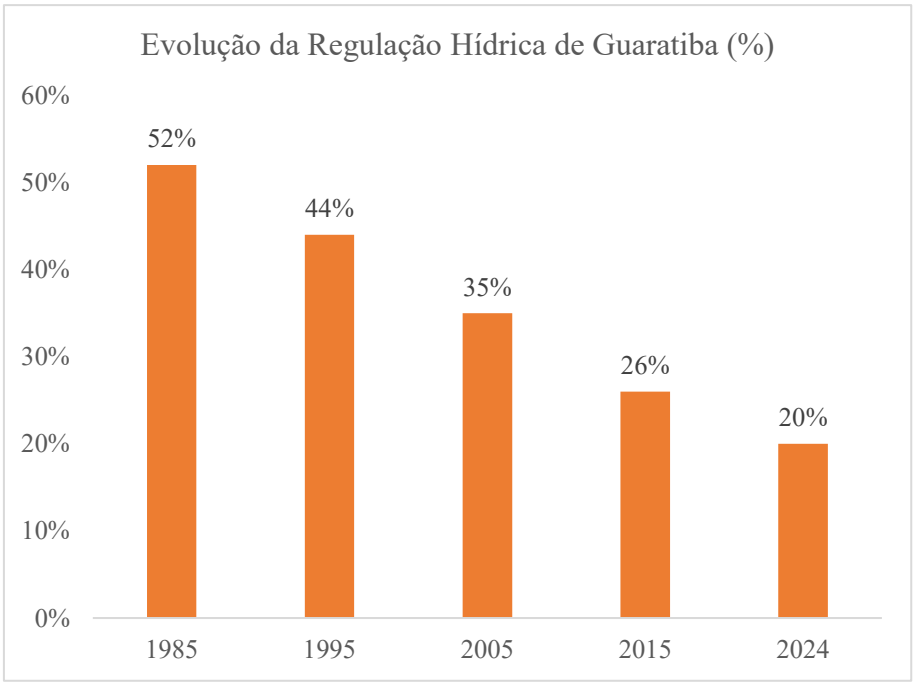


Figura 04: Perfil de Evolução da Regulação Hídrica em Guaratiba.
Fonte: MapBiomas (Coleção 10).

Sobre o Índice de Regulação Hídrica, o percentual final representa uma estimativa integrada da funcionalidade ecossistêmica hídrica, evidenciando como a perda progressiva de cobertura natural e a expansão urbana reduziram drasticamente a capacidade ambiental de Guaratiba em regular água, proteger o solo e mitigar impactos hidrológicos. Essa metodologia permite traduzir mudanças territoriais em indicadores quantitativos comparáveis ao longo do tempo (Tabela 02).

Tabela 02: Tabela de Composição de Índice de Regulação Hídrica (IRH).
Fonte: INEA - GeoINEA.

Ano	Cobertura Natural	APPs Preservadas	Permeabilidade	Pressão Urbana	Índice Bruto	Percentual Final (IRH)
1985	78%	82%	75%	38%	61,2	52%
1995	68%	73%	64%	47%	52,8	44%
2005	56%	61%	53%	58%	42,7	35%
2015	43%	48%	39%	71%	31,5	26%
2024	35%	39%	30%	82%	24,8	20%

Sob uma perspectiva mais ampla, essa desconexão reflete a ausência – ou a fragilidade – de um planejamento urbano orientado por critérios ambientais. A ocupação de áreas ambientalmente sensíveis, como manguezais, apicuns e campos alagados, ou mesmo a transformação de outras áreas, como é o caso do "Mosaico de Usos", demonstra que a expansão urbana em Guaratiba ocorreu, em certa medida, à revelia das limitações ecológicas do território. Tal processo compromete não apenas a integridade dos ecossistemas, mas também a própria sustentabilidade urbana, uma vez que elimina ou reduz serviços ambientais que, posteriormente, precisam ser substituídos por soluções de engenharia mais complexas, custosas e, muitas vezes, menos eficientes.

Por fim, um pilar fundamental para um futuro melhor para o bairro de Guaratiba passa pela adoção de Soluções Baseadas na Natureza (SbN), que utilizam processos naturais para enfrentar desafios urbanos. No Brasil, experiências em outras cidades demonstram o potencial dessas soluções na recuperação de áreas degradadas e redução de riscos socioambientais (Andrade et al., 2025). Por exemplo, seria importante que fossem desenvolvidas ações para a restauração das matas ciliares, reduzindo a erosão, melhorando a qualidade da água e contribuindo para o aumento da biodiversidade. Nesse sentido, seria igualmente importante o aumento das áreas verdes, para a redução das ilhas de calor e ampliação das áreas de lazer, ou seja, para uma melhora na qualidade de vida das pessoas (Goodwin et al., 2024; Cuce et al., 2025; Király et al., 2025). Ressalta-se, ainda, a melhoria na saúde das pessoas proporcionadas pela existência das áreas verdes (Bressane et al., 2024; Buxton et al., 2024), por isso é importante que sejam adotados, cada vez mais, mecanismos que aumentem a arborização e as florestas urbanas, isto é, que tornem as cidades mais verdes.

Cabe destacar, nesse sentido, que o diagnóstico realizado para o Brasil, em escala nacional, não difere substancialmente da realidade observada em Guaratiba. No país, cerca de 33% da população urbana reside em vias sem arborização, enquanto aproximadamente 20% vivem em locais com apenas uma ou duas árvores (BRASIL, 2025). Em outras palavras, mais de 50% da população urbana encontra-se em áreas com cobertura arbórea extremamente reduzida, o que implica uma série de problemas e injustiças socioambientais. Dessa forma, tornam-se urgentes ações voltadas à ampliação das áreas verdes urbanas. Nesse contexto, a adoção de soluções baseadas na natureza configura-se como uma alternativa potencialmente mais econômica e ecologicamente eficiente. A regra 3-30-300, proposta por Konijnendijk (2022), apresenta-se como um caminho promissor. Essa abordagem estabelece que cada pessoa deveria visualizar ao menos três árvores bem desenvolvidas a partir de sua residência, escola e/ou local de trabalho; que a cobertura arbórea de cada bairro deveria atingir, no mínimo, 30%; e que a distância até o espaço verde público mais próximo não ultrapassasse 300 metros. A adoção dessas diretrizes tende a promover um acesso mais justo e equitativo às árvores, aos espaços verdes e aos seus benefícios. Além disso, a ampliação das áreas verdes no ambiente urbano pode gerar uma série de co-benefícios socioambientais. Nesse sentido, para pensar em uma Guaratiba diferente, esse pode ser um caminho particularmente interessante.

Considerações Finais

Desde a segunda metade do século XX, especialmente a partir das décadas de 1980 e 1990, a metrópole carioca passou a direcionar seu crescimento para a Zona Oeste, impulsionada pelo esgotamento relativo do solo urbano nas áreas centrais e pela valorização imobiliária em bairros consolidados. O crescimento urbano de Guaratiba, portanto, não pode ser compreendido como resultado de um único vetor, mas como a sobreposição de fatores históricos, socioeconômicos, institucionais e ambientais, que atuaram de forma cumulativa ao longo das últimas décadas. Esses fatores estruturaram um processo de urbanização periférica marcado por certa informalidade, fragilidade ambiental e déficit de infraestrutura.

Dessa forma, a análise da trajetória de Guaratiba permite compreender que os problemas ambientais atualmente observados – como alagamentos recorrentes, degradação da qualidade da água e perda de biodiversidade – não são eventos isolados, mas sim consequências diretas de um modelo de ocupação territorial que desconsidera a funcionalidade ecológica da paisagem. Trata-se, portanto, de um processo cumulativo, no qual pequenas alterações ao longo do tempo resultam em impactos sistêmicos acumulados.

O planejamento urbano deve considerar, de forma integrada, as características físicas, hidrológicas e ecológicas do território, de modo a evitar a ocupação de áreas inadequadas e promover usos compatíveis com sua capacidade de suporte. A proteção dos remanescentes de manguezais e demais ecossistemas costeiros assume papel central nesse processo, não apenas pela sua importância ecológica, mas também por sua função estratégica na mitigação de riscos ambientais.

Adicionalmente, a incorporação de soluções baseadas na natureza – como a preservação de áreas de inundação natural, ampliação de superfícies permeáveis, plantio de novas florestas e ampliação da arborização urbana, dentre outras – apresenta-se como alternativa fundamental para a requalificação ambiental do território. Essas estratégias permitem restabelecer, ao menos parcialmente, as funções ecológicas perdidas, contribuindo para a melhoria da drenagem urbana, a redução de alagamentos e o

aumento da resiliência frente a eventos extremos. Paralelamente, o fortalecimento das políticas de saneamento ambiental e de drenagem urbana torna-se indispensável, especialmente em áreas já consolidadas, onde os impactos da urbanização são mais evidentes.

Assim, sob o ponto de vista técnico e científico, Guaratiba configura-se como um caso emblemático que evidencia os riscos associados à urbanização acelerada em áreas ambientalmente sensíveis e reforça a necessidade de intervenções integradas, que articulem planejamento urbano, gestão ambiental e infraestrutura sanitária. Mais do que um diagnóstico, essa análise aponta para a urgência de um novo paradigma de ocupação territorial, no qual a cidade deixe de se impor sobre a natureza e passe a se estruturar em consonância com ela, garantindo condições de sustentabilidade e resiliência a longo prazo.

A análise também permitiu identificar que, apesar das fragilidades, Guaratiba apresenta elevado potencial de transformação. A presença de ativos ambientais relevantes, aliada à disponibilidade territorial e à possibilidade de adoção de Soluções Baseadas na Natureza (SbN), configura uma oportunidade concreta para a construção de um modelo urbano mais resiliente e sustentável. Experiências nacionais e internacionais demonstram que a integração entre planejamento urbano, infraestrutura verde e políticas sociais pode gerar resultados expressivos na melhoria da qualidade ambiental e da equidade social.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Mestrado Profissional em Engenharia Urbana e Ambiental, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ANDRADE, A. I. M. S.; MOURA, M. R. F. Infraestrutura verde-azul (BGI) para a redução de inundações compostas em cenário de crise climática no Recife-PE. Revista Latino-Americana de Ambiente Construído & Sustentabilidade, [s.l.], 2025.

BARBIER, E. B. et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services. Ecological Monographs, Washington, v. 81, n. 2, p. 169-193, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Plano Nacional de Arborização Urbana (PlaNAU). Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2025.

BRESSANE, A.; SILVA, M. B.; GOULART, A. P. G.; MEDEIROS, L. C. D. C. Understanding how green space naturalness impacts public well-being: prospects for designing healthier cities. International Journal of Environmental Research and Public Health, Basel, v. 21, 2024. DOI: 10.3390/ijerph21050585.

BUXTON, R. T.; HUDGINS, E. J.; LAVIGNE, E.; VILLENEUVE, P. J.; PRINCE, S. A.; PEARSON, A. L.; HALSALL, T.; ROBICHAUD, C.; BENNETT, J. R. Mental health is positively associated with biodiversity in Canadian cities. Communications Earth & Environment, London, v. 5, 2024. DOI: 10.1038/s43247-024-01482-9.

CUCE, P. M.; CUCE, E.; SANTAMOURIS, M. Towards sustainable and climate-resilient cities: mitigating urban heat islands through green infrastructure. Sustainability, Basel, v. 17, 2025. DOI: 10.3390/su17031303.

GOODWIN, S.; OLAZABAL, M.; CASTRO, A. J.; PASCUAL, U. Measuring the contribution of nature-based solutions beyond climate adaptation in cities. Global Environmental Change, Oxford, v. 89, 2024. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2024.102939.

HARVEY, D.. A produção capitalista do espaço. 2. ed. São Paulo: Annablume, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo demográfico 2000: resultados preliminares. Rio de Janeiro: IBGE, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo demográfico 2010: resultados preliminares. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo demográfico 2022: resultados preliminares. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Manual técnico de uso da terra. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). Portal GeoINEA Municípios. Rio de Janeiro: INEA, 2020.

KIRÁLY, É.; ILLÉS, G.; BOROVICS, A. Green infrastructure for climate change mitigation: assessment of carbon sequestration and storage in the urban forests of Budapest, Hungary. Urban Science, Basel, v. 9, 2025. DOI: 10.3390/urbansci9050137.

KONIJNENDIJK, C. C. Evidence-based guidelines for greener, healthier, more resilient neighbourhoods: introducing the 3–30–300 rule. Journal of Forestry Research, Beijing, v. 34, p. 821-830, 2023. DOI: 10.1007/s11676-022-01523-z.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomas – Coleção 10 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. São Paulo: MapBiomas, 2024. Disponível em: https://mapbiomas.org. Acesso em: 9 abr. 2026.

MARICATO, E.. O impasse da política urbana no Brasil. 3. ed. Petrópolis: Vozes, 2011.

MCHARG, I. L. Design with nature. New York: Natural History Press, 1969.

NAÇÕES UNIDAS. Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais. Divisão de População. Perspectivas da urbanização mundial: revisão de 2018: destaques (ST/ESA/SER.A/352). New York: United Nations, 2018.

SANTOS, M. A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção. 4. ed. São Paulo: Edusp, 2006.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. Manguezal: ecossistema entre a terra e o mar. São Paulo: Caribbean Ecological Research, 1995.

SOARES, M. L. G. et al. Mangrove forests associated with salt flats: a case study from southeast Brazil. Brazilian Journal of Oceanography, São Paulo, v. 65, n. 2, p. 102-115, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/S1679-87592017083006502.

SPIRN, A. W. The granite garden: urban nature and human design. New York: Basic Books, 1984.

TROLL, C. Landscape ecology (geoecology) and biogeocenology: a terminological study. Geoforum, Oxford, v. 8, n. 1, p. 43-46, 1977.

WILKES-ALLEMANN, J. et al. Envisioning the future: creating sustainable, healthy and resilient BioCities. Urban Forestry & Urban Greening, Amsterdam, v. 84, p. 1-16, 2023.

XERISCAPING: FATORES DE ADOÇÃO DA TÉCNICA DE PAISAGISMO SOB A PERSPECTIVA DA MATRIZ SWOT

1 Gabriel A. Barbosa, 2 D.Sc. Sandro Valença, 3 M.Sc. Vinícius A. Barbosa, 4 Italo C. da S. Soares, 5 Maria Clarice do Nascimento, 6 Geysiele G. Lima, 7 Gabrielly T. Pereira, 8 Alexandre Willian S. Silva

1 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: gabriel.azevedobarbosa@ufpe.br; 2 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: sandro.silva@ufpe.br; 3 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: vinicius.azevedobarbosa@ufpe.br, 4 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: italo.soares@ufpe.br; 5 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail:clarice.nascimento@ufpe.br; 6 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: geysiele.lima@gmail.com; 7 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail:gabrielly.gtp@ufpe.br; 8 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail:alexandre.willian@ufpe.br

Palavras-chave: Paisagismo; *Xeriscaping*; Sustentabilidade Urbana.

Resumo

As mudanças climáticas, a urbanização acelerada e a crescente pressão sobre os recursos hídricos têm ampliado os desafios relacionados ao planejamento e à manutenção de áreas verdes, especialmente em regiões áridas e semiáridas. Nesse contexto, a *xeriscaping* destaca-se como alternativa ao paisagismo tradicional por priorizar a eficiência no uso da água, a valorização de espécies adaptadas às condições locais e a integração entre funções ecológicas, sociais e estéticas da paisagem. O presente artigo teve como objetivo identificar os fatores que influenciam a adoção da *xeriscaping* como técnica de paisagismo. Para isso, realizou-se uma revisão integrativa da literatura com artigos científicos publicados em 2023 e 2024, indexados na base ScienceDirect. Os achados foram organizados por meio de uma adaptação da análise SWOT, permitindo sistematizar fatores internos e externos relacionados à adoção da técnica. Os resultados indicam que a *xeriscaping* apresenta como principais forças a eficiência hídrica, o potencial de adaptação climática, a contribuição para a biodiversidade urbana e a redução dos custos de manutenção a longo prazo. Por outro lado, foram identificadas fraquezas relacionadas aos custos iniciais de implantação, à necessidade de qualificação técnica e à resistência estética ainda presente em parte dos contextos analisados. No ambiente externo, destacam-se oportunidades associadas ao avanço das agendas de sustentabilidade urbana e conservação ambiental, bem como ameaças ligadas à fragilidade da governança, aos eventos climáticos extremos e às barreiras socioculturais. Conclui-se que a adoção da *xeriscaping* depende da articulação entre atributos técnicos e condições institucionais, culturais e ecológicas, revelando seu potencial como estratégia de paisagismo urbano mais resiliente, especialmente em regiões com restrição hídrica.

Introdução

As mudanças climáticas, a urbanização acelerada e a crescente pressão sobre os recursos hídricos têm ampliado os desafios relacionados ao planejamento e à manutenção de áreas verdes, sobretudo em regiões áridas e semiáridas (Soriano *et al.*, 2024). Nesse contexto, as áreas verdes urbanas tornam-se relevantes não apenas por seu valor estético, mas também por suas funções ecológicas, sociais e climáticas, contribuindo para a regulação do microclima, para a mitigação das ilhas de calor e para a adaptação das cidades a condições ambientais cada vez mais adversas (Chow & Brazel, 2012; Rafi, Kazemi & Tehranifar, 2020).

Entretanto, de forma recorrente, projetos de paisagismo em regiões áridas e semiáridas tendem a reproduzir modelos estéticos oriundos de ecossistemas e biomas temperados e subtropicais, privilegiando plantas exóticas e espécies higrófitas que demandam irrigação constante e elevados volumes de água para sua manutenção. Diamant *et al.* (2025) apontam que a vegetação utilizada em áreas verdes — públicas ou privadas — de ecossistemas e biomas carentes em recursos hídricos, com frequência, desconsidera as condições ecológicas locais, resultando na implantação de jardins com alta dependência de irrigação e que apresentam composição de plantas pouco compatíveis com a flora nativa. Tal prática — sustentada por preferências culturais e modelos importados, principalmente, da Europa — intensifica o consumo hídrico, agrava os efeitos do estresse térmico e contribui para paisagens pouco resilientes frente às mudanças climáticas e à crescente escassez de água.

No Brasil, a problemática assume maior relevância nas áreas semiáridas, em especial no bioma Caatinga, onde a disponibilidade hídrica é limitada e a flora nativa apresenta características adaptativas importantes ao uso paisagístico (Alvarez & Kiill, 2014; Silva, 2014). Não obstante, o aproveitamento dessas espécies ainda permanece restrito, mesmo ante seu potencial ecológico, ornamental e funcional (Coutinho *et al.*, 2017; Alencar *et al.*, 2019).

Assim, a busca por alternativas de paisagismo sustentáveis ecológica, social e economicamente torna-se fundamental para compreender como práticas mais eficientes podem ser incorporadas ao planejamento urbano e organizacional, em particular, em regiões áridas e semiáridas, onde a necessidade de soluções inovadoras e adaptativas se mostra cada vez mais urgente. Por outro lado, tais soluções já se encontram disponíveis na natureza, porém exigem adaptação técnico-institucional e aceitação sociocultural para sua implementação.

A *xeriscaping* desponta, então, como uma alternativa ao paisagismo tradicional, por reunir princípios dirigidos à eficiência no uso da água, à valorização de espécies aptas às condições ambientais locais e à redução da necessidade de irrigação suplementar. Rafi, Kazemi & Tehranifar (2020) definem *xeriscaping* — também denominada *water-wise landscaping* ou *low-input landscaping* — como uma técnica de paisagismo orientada à eficiência no uso da água, fundamentada na adaptação do *design* paisagístico às condições climáticas e ecológicas locais. Ela apresenta potencial para reduzir custos de manutenção,

ampliar a conservação da biodiversidade urbana e fortalecer estratégias de adaptação climática em áreas públicas e privadas (Çetin, Mansuroğlu & Önaç, 2018).



Figura 1: Jardim residencial com características de *xeriscaping*.
Fonte: Autoria própria (2024)

Embora a literatura científica reconheça a existência de fatores técnicos, econômicos, culturais, institucionais e ecológicos que influenciam a adoção da *xeriscaping* (Rafi; Kazemi & Tehranifar, 2020; Green et al., 2024), semelhantes elementos costumam aparecer dispersos e fragmentados. Essa dispersão dificulta a construção de uma compreensão integrada sobre o fenômeno e limita tanto o avanço do conhecimento acadêmico quanto a formulação de diretrizes capazes de subsidiar gestores públicos, urbanistas, paisagistas e demais atores envolvidos com o planejamento de áreas verdes. Portanto, a ausência de uma síntese estruturada sobre os fatores de adoção da técnica constitui um problema relevante, ressaltado em contextos territoriais marcados por escassez hídrica e carências de soluções urbanas mais sustentáveis.

Logo, o presente artigo tem por objetivo identificar os fatores relacionados à adoção da *xeriscaping* como técnica de paisagismo, a partir de uma revisão integrativa da literatura (RIL). Ao sistematizar tais fatores, busca-se contribuir ao debate sobre sustentabilidade urbana, gestão eficiente da água e planejamento paisagístico adaptado às realidades ambientais contemporâneas, com especial pertinência ao Nordeste brasileiro. A relevância do artigo reside, por conseguinte, em oferecer uma base analítica que favoreça tanto a compreensão acadêmica do tema quanto à elaboração de diretrizes técnicas e institucionais para a implantação de áreas verdes mais resilientes, compatíveis com os limites ecológicos locais e alinhadas às demandas atuais de adaptação climática.

Material e Métodos

Este trabalho caracteriza-se como uma RIL (Mendes, Silveira & Galvão, 2008; Souza, Silva & Carvalho, 2010; Botelho, Cunha & Macedo, 2011), escolhida por permitir a reunião, a sistematização e a interpretação de produções científicas sobre um tema específico, favorecendo a construção de uma visão abrangente acerca dos fatores que influenciam a adoção da *xeriscaping* como técnica de paisagismo. Aqui, a RIL foi conduzida com foco em publicações científicas recentes, de modo a privilegiar evidências atualizadas sobre o tema.

O levantamento documental foi realizado na plataforma ScienceDirect, calcado em artigos científicos publicados nos anos de 2023 e 2024. A delimitação temporal buscou garantir atualidade e viabilidade analítica, considerando a amplitude da produção existente em anos anteriores. Foram incluídos apenas artigos redigidos em língua inglesa, disponíveis integralmente na base consultada e relacionados direta ou indiretamente à *xeriscaping*; e excluídos os artigos publicados em 2025, em razão da possível indexação incompleta na base no momento da coleta, bem como documentos com baixa aderência ao tema central da pesquisa, isto é, textos que abordavam apenas de forma genérica assuntos como sustentabilidade urbana, gestão hídrica ou infraestrutura verde, sem relação consistente com a técnica analisada.

A seleção dos artigos foi orientada por um critério de adesão temática. Assim, os artigos foram classificados conforme o modo como abordavam a *xeriscaping*: de forma direta, quando tratavam da técnica em revisões de literatura ou em relatos de experiências práticas; de forma indireta, quando apresentavam práticas, políticas, espécies vegetais ou incentivos aplicáveis à técnica; e de forma conceitual, quando se limitavam a discutir sustentabilidade urbana, gestão hídrica ou infraestrutura verde sem aprofundamento suficiente sobre *xeriscaping*. Para fins de composição do *corpus*, mantiveram-se os artigos com relação direta ou indireta, enquanto os de natureza apenas conceitual foram excluídos.

Por fim, os achados extraídos dos artigos selecionados foram organizados por meio de uma adaptação da matriz SWOT, com o objetivo de classificar os fatores identificados em forças, fraquezas, oportunidades e ameaças relacionadas à adoção da *xeriscaping*.

No presente artigo, a matriz foi adaptada de sua aplicação tradicional a organizações para a análise da *xeriscaping* como técnica de paisagismo. Em sua formulação clássica, a SWOT é empregada para diagnosticar fatores internos e externos que influenciam o desempenho organizacional, distinguindo forças e fraquezas — como componentes internos — e oportunidades e ameaças — como componentes externos (Gürel & Tat, 2017; Cavalcanti & Guerra, 2019; Karadzhov, 2025). Aqui, contudo, a matriz foi reinterpretada para atender a um objeto peculiar: não uma organização, mas uma técnica cujos resultados dependem de condições próprias e, ao mesmo tempo, do ambiente institucional, cultural e ecológico em que é adotada.

A adaptação baseou-se no entendimento de que a *xeriscaping* não pode ser analisada apenas como prática ornamental, mas como uma solução de paisagismo urbano cuja viabilidade depende da interação entre fatores técnicos, ecológicos, institucionais e socioculturais. Assim, sua adoção foi compreendida como parte de um sistema aberto (Besio & Tacke, 2023), no qual diferentes condicionantes se influenciam mutuamente, justificando uma leitura relacional e não reducionista do objeto.

Do ponto de vista operacional, a adaptação ocorreu na etapa de análise dos achados da RIL. Após a seleção e leitura dos artigos do *corpus*, cada evidência identificada foi interpretada, segundo sua natureza e seu efeito sobre a adoção da *xeriscaping*. Quando a evidência indicava um atributo positivo intrínseco à técnica, ela era classificada como força; quando revelava uma limitação interna, relacionada ao seu desempenho, à sua aplicação ou à sua aceitação, era classificada como fraqueza. Por outro lado, quando a evidência apontava condições externas capazes de ampliar a difusão, a legitimação ou a inserção da técnica em políticas e práticas urbanas, ela era enquadrada como oportunidade; e, quando expressava elementos contextuais capazes de restringir, desestimular ou comprometer seus benefícios, era enquadrada como ameaça. O procedimento permitiu converter evidências dispersas da literatura em uma estrutura analítica comparável, ordenada em quatro quadrantes.

Resultados e Discussão

O Quadro 1, abaixo, apresenta os textos que compõem o *corpus* analisado, reunindo, de forma sintética, os artigos selecionados na RIL. Ao todo, o *corpus* se compôs com 19 artigos publicados em 2023 e 2024, selecionados a partir da relação temática com o objeto de análise — a técnica de paisagismo *xeriscaping*. Mais do que um levantamento descritivo, o quadro delimita empiricamente o universo analisado e evidencia a diversidade de enfoques presentes na literatura recente sobre *xeriscaping* e temas correlatos. A partir do *corpus*, é possível discutir os principais resultados encontrados, com ênfase nos fatores que influenciam a adoção da técnica, ordenados analiticamente, com base na adaptação da matriz SWOT.

Título	Autores	Ano	Periódico
A comprehensive review on the ethnobotanical, phytochemical, and pharmacological aspects of the genus Malvastrum	Sheema *et al.*	2023	Fitoterapia
A fine is more than a price: Evidence from drought restrictions	Pratt	2023	Journal of Environmental Economics and Management
A review of interconnected challenges in the water–energy–food nexus: Urban pollution perspective towards sustainable development	Javan *et al.*	2024	Science of The Total Environment
Effect of irrigation levels on the physiological responses of petunia cultivars for selection	Rebi *et al.*	2024	Ecological Frontiers
Effects of different chloride salts on seed germination and early seedling performance of Ceratonia siliqua, a multipurpose tree of the Mediterranean region	Dadach *et al.*	2023	South African Journal of Botany
Egypt's waterways conservation campaigns under growing intrinsic demand and Nile upstream damming	Fouad *et al.*	2023	Journal of Hydrology: Regional Studies
Harmful dust from drying lakes: Preserving Great Salt Lake (USA) water levels decreases ambient dust and racial disparities in population exposure	Grineski *et al.*	2024	One Earth
Influence of water spraying intervals and indole-3-butyric acid concentrations on Salvia rooted cuttings quality in a closed aeroponics system	Scaltrito *et al.*	2024	Scientia Horticulturae
People's preferences and perceptions toward low-input versus conventional park design approaches using 3D images and interview-based questionnaires	Kazemi, Hosseinpour & Ebrahimian	2023	Urban Forestry & Urban Greening
Policy analysis for informing climate adaptation, environmental resilience, and irrigation demands in the Rio Grande Basin	Idhirij & Ward	2024	Journal of Environmental Management
Quantifying the cumulative cooling effects of 3D building and tree shade with high resolution thermal imagery in a hot arid urban climate	Park *et al.*	2023	Landscape and Urban Planning
Revisiting the concept, urban practices, current advances, and future prospects of green infrastructure	Addo-Bankas *et al.*	2024	Science of The Total Environment
Sidewalks, trees and shade matter: A visual landscape assessment approach to understanding people's preferences for walking	Tabatabaie, Litt & Muller	2023	Urban Forestry & Urban Greening
Tetraploidy induction enhances morphological, physiological and biochemical characteristics of wallflower (Erysimum cheiri (L.) Crantz)	Fakhrzad *et al.*	2023	Scientia Horticulturae
The association between maintenance and biodiversity in urban green spaces: A review	Hu & Lima	2024	Landscape and Urban Planning
The future of water in a desert river basin facing climate change and competing demands: A holistic approach to water sustainability in arid and semi-arid regions	Hargrove *et al.*	2023	Journal of Hydrology: Regional Studies
The genesis of an extremely acidic perched aquifer within roasted pyrite waste in a fully urbanized area (Zaragoza, Spain)	Beltrán *et al.*	2023	Science of The Total Environment
Urban green spaces and sustainability: Exploring the ecosystem services and disservices of grassy lawns versus floral meadows	Paudel & States	2023	Urban Forestry & Urban Greening
Urban greenness and its cooling effects are influenced by changes in drought, physiography, and socio-demographics in Los Angeles, CA	Kucera & Jenerette	2023	Urban Climate

Quadro 1 – Artigos que compõem o *corpus* de pesquisa
Fonte: Autoria própria (2025)

Entre os principais achados, sobressaem inicialmente as forças da técnica, entendidas como atributos internos que reforçam sua viabilidade, legitimidade e potencial de contribuição ao planejamento urbano sustentável. Elas mostram que a *xeriscaping* não se restringe a uma alternativa de economia de água, mas reúne características capazes de ampliar sua inserção em estratégias de infraestrutura verde, adaptação climática e qualificação ambiental das cidades.

As forças associadas à *xeriscaping* evidenciam atributos favoráveis à sua adoção em contextos urbanos marcados por restrições hídricas e necessidade de soluções ambientais mais resilientes. A primeira delas é a eficiência hídrica comprovada, uma vez que diferentes experimentos com espécies utilizadas em projetos de *xeriscaping* demonstram bom desempenho, mesmo sob condições de baixa irrigação, confirmando o potencial da técnica para reduzir o consumo de água sem inviabilizar a composição paisagística (Rebi *et al.*, 2024; Scaltrito *et al.*, 2024). Esse aspecto é particularmente relevante em regiões onde a limitação hídrica impõe a necessidade de modelos de paisagismo mais compatíveis com a disponibilidade local do recurso.

Outra força importante identificada no *corpus* refere-se ao reconhecimento da *xeriscaping* como componente de infraestrutura verde (Addo-Bankas *et al.*, 2024; Grineski *et al.*, 2024; Javan *et al.*, 2024). Os autores indicam que a técnica vem sendo legitimada não apenas como prática de jardinagem de baixo consumo hídrico, mas também como ação articulada à conservação ambiental, à melhoria da qualidade urbana e à adaptação das cidades frente às mudanças climáticas. O respaldo técnico e institucional fortalece sua inserção em debates contemporâneos sobre sustentabilidade urbana e amplia seu valor para políticas de planejamento e gestão territorial.

Outrossim, destacou-se como força a contribuição da *xeriscaping* à conservação da biodiversidade, especialmente pelo uso de plantas nativas e adaptadas às condições ecológicas locais (Paudel & States, 2023; Hu & Lima, 2024). Ao reduzir a dependência de espécies exóticas de alta exigência hídrica e ao favorecer arranjos paisagísticos de baixa manutenção, a técnica pode criar condições mais favoráveis à flora e à fauna locais, reforçando funções ecológicas importantes em ambientes urbanos. Nesse sentido, a *xeriscaping* ultrapassa a estrita lógica ornamental e passa a ser compreendida como prática capaz de articular estética, funcionalidade e conservação ecológica.

A aceitação estética, quando há comunicação adequada, também apareceu como força relevante (Kazemi, Hosseinpour & Ebrahimian, 2023). Os autores afirmam que a percepção negativa muitas vezes associada a paisagens de baixa irrigação não é fixa, podendo ser alterada quando o conceito da técnica é explicado aos usuários. Isso indica que a valorização social da *xeriscaping* pode ser ampliada por ações de sensibilização, educação ambiental e comunicação pública, o que fortalece sua legitimidade e reduz resistências embasadas apenas em padrões convencionais de beleza paisagística.

Por fim, Kucera & Jenerette (2023) e Park *et al.* (2023) apontam o conforto térmico urbano como outra força expressiva da técnica. A combinação entre sombreamento e cobertura vegetal, mesmo em composições xerófitas, contribui para a redução da temperatura superficial e à mitigação das ilhas de calor, em particular em regiões quentes, o que demonstra que a *xeriscaping* não se limita à conservação de água, mas pode atuar como estratégia multifuncional de adaptação climática, gerando benefícios mais amplos, inclusive com potencial de redução de custos energéticos associados ao resfriamento artificial.

Em conjunto, as forças indicam que a *xeriscaping* conta com suporte técnico e ecológico robustos para se consolidar como alternativa viável ao paisagismo tradicional em cidades sujeitas à escassez hídrica e ao aquecimento urbano.

Entre as principais fraquezas identificadas na literatura, destacam-se os custos iniciais de implantação da *xeriscaping*, que podem funcionar como barreira à sua adoção, salientando-se em contextos de menor disponibilidade financeira (Pratt, 2023; Addo-Bankas *et al.*, 2024; Scaltrito *et al.*, 2024). Embora a técnica tenda a gerar economia hídrica e diminuição dos custos de manutenção no longo prazo, sua implantação pode exigir investimentos em estrutura, adaptação do sistema de irrigação e manejo especializado.

Assim, de imediato, outra fraqueza relevante é a necessidade de mão de obra especializada, já que a seleção das espécies, o desenho paisagístico e a condução do manejo demandam conhecimentos técnicos peculiares (Scaltrito *et al.*, 2024). Quando esses requisitos não são atendidos, aumentam os riscos de baixo desempenho do projeto e de percepção negativa sobre a técnica.

Ademais, a resistência estética permanece como uma fraqueza importante (Kazemi, Hosseinpour & Ebrahimian, 2023). Parte dos estudos revisados indica que a *xeriscaping* ainda é, por vezes, associada a paisagens áridas, pouco atrativas ou visualmente inferiores ao paisagismo convencional representado por gramados e outras plantas de alta demanda hídrica. Tal percepção tende a se intensificar quando faltam estratégias de comunicação e sensibilização capazes de explicar os princípios e benefícios da técnica.

Soma-se a tanto o risco de planejamento inadequado (Kucera & Jenerette, 2023; Park *et al.*, 2023), uma vez que projetos mal concebidos podem comprometer resultados esperados, seja em termos de conforto térmico, funcionalidade ecológica ou qualidade visual.

Não obstante, as fraquezas da *xeriscaping* não anulam seu potencial, contudo evidenciam que sua consolidação depende de qualificação técnica, planejamento criterioso e maior legitimação social.

No plano externo, a literatura aponta um conjunto de oportunidades que favorece a ampliação da *xeriscaping* no planejamento urbano. A primeira delas está relacionada ao fortalecimento de políticas públicas de conservação do ambiente natural, adaptação climática, uso racional da água, infraestrutura verde e soluções baseadas na natureza, que criam um ambiente mais receptivo à incorporação da técnica em projetos e programas urbanos (Fouad *et al.*, 2023; Hargrove *et al.*, 2023; Pratt, 2023; Addo-Bankas *et al.*, 2024). Quando associadas a instrumentos de financiamento, incentivos fiscais e parcerias entre Estado, setor privado e sociedade civil, as iniciativas podem acelerar sua difusão em maior escala e contribuir para que a *xeriscaping* deixe de ser uma opção pontual, passando a ocupar lugar mais estável nas estratégias de sustentabilidade urbana.

Outra oportunidade relevante decorre do avanço das agendas de equidade climática, justiça ambiental e saúde pública. Grineski *et al.* (2024) indicam que a técnica pode gerar "cobenefícios" sociais inestimáveis, como a redução de poeira em áreas urbanas, a ampliação do sombreamento e a melhoria das condições de caminhabilidade, sobretudo em territórios mais vulneráveis (Kucera & Jenerette, 2023; Tabatabaie, Litt & Muller, 2023). Nesse sentido, a *xeriscaping* pode ser compreendida não apenas como resposta à escassez hídrica, mas também como instrumento de aperfeiçoamento ambiental e redistribuição de benefícios urbanos, o que amplia seu valor estratégico para gestores públicos e formuladores de políticas.

Também se destaca como oportunidade o fortalecimento da cadeia produtiva de espécies ornamentais adaptadas à seca. Dadach *et al.* (2023), Fakhrzad *et al.* (2023) e Scaltrito *et al.* (2024) ressaltam que o avanço de viveiros especializados, de pesquisas aplicadas e de técnicas de produção de mudas vêm ampliando a oferta de plantas nativas e resistentes, favorecendo a implantação de projetos mais diversos e tecnicamente avançados. O movimento tende a estimular a inovação no setor e a consolidar um mercado mais estruturado em torno da técnica, principalmente quando apoiado por políticas públicas que incentivem o cultivo, a produção e a comercialização de espécies adequadas.

Em conjunto, as oportunidades mostram que o contexto contemporâneo de crise hídrica e transição ecológica cria condições favoráveis para a expansão da *xeriscaping* como alternativa estratégica para cidades mais resilientes.

Ainda no ambiente externo, as ameaças identificadas na literatura atestam que a adoção da *xeriscaping* depende de condições estruturais que podem limitar sua expansão. Entre elas, destaca-se a intensificação da crise hídrica, que, embora reforce a necessidade de técnicas mais eficientes, também pode comprometer até mesmo a irrigação mínima necessária em determinadas fases de implantação e estabelecimento da vegetação (Hargrove *et al.*, 2023; Grineski *et al.*, 2024; Idhirij & Ward, 2024). Soma-se ainda a fragilidade da governança institucional, expressa na ausência de políticas integradas, na descontinuidade administrativa e na dificuldade de incorporar a técnica de forma estável ao planejamento urbano em larga escala (Javan *et al.*, 2024).

Outra ameaça relevante refere-se aos eventos climáticos extremos, como ondas de calor, chuvas intensas, poeira urbana e processos de salinização do solo, que podem comprometer a sobrevivência das espécies e o desempenho dos projetos (Beltrán *et al.*, 2023; Dadach *et al.*, 2023; Hargrove *et al.*, 2023; Grineski *et al.*, 2024). Além disso, persistem barreiras socioculturais associadas à preferência por gramados tradicionais e à resistência estética à vegetação xerófita, o que dificulta a aceitação social da técnica em algumas situações (Fouad *et al.*, 2023; Kazemi, Hosseinpour & Ebrahimian, 2023; Pratt, 2023; Tabatabaie, Litt & Muller, 2023; Hu & Lima, 2024). Por fim, a literatura também aponta possíveis desequilíbrios ecológicos, como a proliferação de vetores ou o comportamento invasor de determinadas espécies, quando os jardins de baixa manutenção não são corretamente planejados e manejados (Paudel & States, 2023; Sheema *et al.*, 2023).

Tais ameaças evidenciam que a consolidação da *xeriscaping* exige não apenas qualificação técnica, mas também governança, monitoramento e mediação cultural.

Em conjunto, os resultados expostos evidenciam que a adoção da *xeriscaping* não depende só de atributos técnicos isolados, mas da interação entre elementos internos e externos que condicionam sua viabilidade, aceitação e consolidação no planejamento urbano. As forças revelam que a técnica possui base ecológica, funcional e institucional consistente, enquanto as fraquezas apontam limites operacionais, econômicos e socioculturais que ainda dificultam sua difusão. De modo complementar, as oportunidades indicam a existência de um contexto favorável à sua expansão, mormente diante das agendas contemporâneas de sustentabilidade urbana, adaptação climática e conservação ambiental, ao passo que as ameaças demonstram que sua implantação permanece vulnerável à fragilidade da governança, aos eventos extremos e às resistências sociais. O Quadro 2 sintetiza os resultados.

FORÇAS	FRAQUEZAS
• Eficiência hídrica comprovada; **• Reconhecimento em Infraestrutura Verde;** **• Conservação da biodiversidade;** **• Aceitação estética quando bem comunicada; e** **• Melhora do conforto térmico urbano.**	**• Altos custos de implantação;** **• Carência de mão de obra qualificada;** **• Estigma estético persistente; e** **• Planejamento inadequado pode anular benefícios.**
OPORTUNIDADES	**AMEAÇAS**
• Políticas de conservação ambiental em expansão; **• Expansão de agendas de equidade climática, justiça ambiental e saúde pública; e** **• Cadeia produtiva e inovação hortícola.**	**• Acentuação da crise hídrica;** **• Fragilidade da governança institucional;** **• Aumento de eventos climáticos extremos;** **• Barreiras socioculturais; e** **• Possíveis desequilíbrios ecológicos.**

Quadro 2 – Matriz SWOT resultante
Fonte: Autoria própria (2025)

A síntese apresentada pelo Quadro 2 corresponde à matriz SWOT resultante, na qual os fatores identificados na RIL são ordenados sistematicamente, destacando os principais condicionantes à adoção da *xeriscaping* como estratégia de paisagismo urbano.

Considerações Finais

A adoção da *xeriscaping* como técnica de paisagismo não depende apenas de seus atributos técnicos, mas também de articulação entre fatores internos e externos a ela, que condicionam sua viabilidade, aceitação e consolidação. A revisão integrativa de literatura (RIL) mostrou que a técnica, em seu ambiente interno, reúne forças relevantes, como eficiência hídrica, adaptação climática, contribuição à biodiversidade urbana e potencial de redução de custos de manutenção; apresenta e, de imediato, enfrenta fraquezas, como custos iniciais de implantação, necessidade de qualificação técnica e persistência de resistências estéticas. A RIL mostrou ainda que a *xeriscaping*, em seu ambiente externo, reúne oportunidades, associadas às agendas de sustentabilidade urbana, conservação ambiental e uso racional da água; e, simultaneamente, ameaças associadas à fragilidade da governança, aos eventos climáticos extremos e às barreiras socioculturais. À luz dos resultados obtidos, a matriz

SWOT resultante permitiu sistematizar evidências que, na literatura, aparecem dispersas, oferecendo uma leitura sintetizada dos principais condicionantes à adoção da técnica.

A combinação da RIL com a matriz SWOT ordenou fatores da *xeriscaping* em uma estrutura analítica integrada e coerente e, assim, reforçou a compreensão sobre ela como estratégia de paisagismo urbano com potencial de apoiar processos mais amplos de adaptação climática e planejamento urbano sustentável.

Conclui-se, portanto, que a *xeriscaping* possui relevância estratégica para contextos marcados por restrição hídrica, sobretudo no Nordeste brasileiro, onde sua compatibilidade com as características ecológicas da Caatinga amplia seu valor como instrumento de governança socioambiental e de construção de cidades mais resilientes.

As conclusões aqui apresentadas, no entanto, podem, e devem, ser enriquecidas, aprofundando-se as pesquisas a partir de recortes temporais mais amplos — anteriores e posteriores aos anos de 2023 e 2024 — e utilizando-se diferentes bases fornecedoras de artigos científicos — além da ScienceDirect. Por certo, então, novas realidades urbanas e novos fatores peculiares vão aparecer.

Referências Bibliográficas

ADDO-BANKAS, O.; WEI, T.; ZHAO, Y.; BAI, X.; NÚÑEZ, A. E. & STEFANAKIS, A. Revisiting the concept, urban practices, current advances, and future prospects of green infrastructure. **The Science of The Total Environment**, v. 954, n. 176473, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724066294>. Acesso em: 16 jun. 2025.

ALENCAR, M. do S. F. *et al.* A Caatinga no paisagismo e arborização urbana. **Revista Tema**, v. 20, n. 32, p. 1-20, 2019.

ALVAREZ, I.; KIILL, L. Arborização, floricultura e paisagismo com plantas da Caatinga. **Embrapa.br**, 2014. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1003459>. Acesso em: 21 jun. 2025.

BELTRÁN, J.; MARAZUELA, M.; BAQUEDANO, C.; MARTÍNEZ-LEON, J.; NAVARRO, J.; CRUZ-PÉREZ, N.; SANTAMARTA, J. & GARCÍA-GIL, A. The genesis of an extremely acidic perched aquifer within roasted pyrite waste in a fully urbanized area (Zaragoza, Spain). **The Science of The Total Environment**, v. 896, n. 165293, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723039165>. Acesso em: 16 jun. 2025.

BESIO, C.; TACKE, V. Old and New Organizational Forms in a Complex Society: A Systems-Theoretical Perspective. **Critical Sociology**, v. 50, n. 7-8, 2023. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/08969205231189472>. Acesso em: 3 abr. 2026.

BOTELHO, L.; CUNHA, C. & MACEDO, M. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. **Gestão e Sociedade**, v. 5, n. 11, 2011. Disponível em: <https://ges.face.ufmg.br/index.php/gestaoesociedade/article/view/1220>. Acesso em: 22 set. 2025.

CAVALCANTI, L. & GUERRA, M. Diagnóstico institucional da Universidade Federal da Paraíba a partir da análise SWOT. **Revista Meta: Avaliação**, v. 11, n. 33, 2019. Disponível em: <https://revistas.cesgranrio.org.br/index.php/metaavaliacao/article/view/2270>. Acesso em: 22 set. 2025.

ÇETIN, N.; MANSUROĞLU, S. & ÖNAÇ, A. Xeriscaping feasibility as an urban adaptation method for global warming: A case study from turkey. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 27, n. 3, p. 1009–1018, 2018. Disponível em: <https://www.pjoes.com/Xeriscaping-Feasibility-as-an-Urban-Adaptation-nMethod-for-Global-Warming-nA-Case,76678,0,2.html>. Acesso em: 16 jun. 2025.

CHOW, W. & BRAZEL, A. Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city. **Building and Environment,** v. 47, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132311002411?via%3Dihub>. Acesso em: 16 jun. 2025.

COUTINHO, M.; SILVA, C.; CARVALHO, L.; BRASIL, M.; RODRIGUES, M. & SANTOS, P. A beleza seca: aspectos do paisagismo no semiárido brasileiro. **MIX Sustentável**. v. 3, n. 2, 2017. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/1938>. Acesso em: 22 set. 2025.

DADACH, M.; GAIROLA, S; HAMEED, A. & EL-KEBLAWY, A. Effects of different chloride salts on seed germination and early seedling performance of Ceratonia siliqua, a multipurpose tree of the Mediterranean region. **South African Journal of Botany**, v. 158, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254629923002375>. Acesso em: 22 set. 2025.

DIAMANT, E.; OSWALD, K.; AWOYEMI, A.; GASTON, K.; MacGREGOR-FORS, I.; BERGER-TAL, O. & ROLL, U. The

importance of biome in shaping urban biodiversity. **Trends in Ecology & Evolution**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169534725000862>. Acesso em: 22 set. 2025.

FAKHRZAD, F.; JAWKAR, A.; SHEKAFANDEH, A.; KERMANI, M. J. & MOGHADAM, A. Tetraploidy induction enhances morphological, physiological and biochemical characteristics of wallflower (Erysimum cheiri (L.) Crantz). **Scientia Horticulturae**, v. 308, n. 111596, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423822007142>. Acesso em: 16 jun. 2025.

FOUAD, S.; HEGGY, E.; RAMAH, M.; ABOTALIB, A.; PALMER, E.; JOMAA, S. & WEILACHER, U. Egypt's waterways conservation campaigns under growing intrinsic demand and Nile upstream damming. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 50, n. 101537, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581823002240>. Acesso em: 16 jun. 2025.

GREEN, J. C. *et al.* Patterns of water-wise residential landscaping in a drought-prone city. **Journal of Urban Ecology**, v. 10, n. 1, 2024. Disponível em: < https://academic.oup.com/jue/article/10/1/juae003/7615459>. Acesso em: 25 abr. 2026

GRINESKI, S.; MALLIA, D.; COLLINS, T.; ARAOS, M.; LIN, J.; ANDEREGG, W. & PERRY, K. Harmful dust from drying lakes: preserving Great Salt Lake (USA) water levels decreases ambient dust and racial disparities in population exposure. **One Earth**, v. 7, n. 6, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332224002495>. Acesso em: 16 jun. 2025.

GÜREL, E. & TAT, M. SWOT Analysis: a theoretical review. **Journal of International Social Research**, v. 10, n. 51, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/319367788_SWOT_Analysis_A_Theoretical_Review>. Acesso em: 22 set. 2025.

HARGROVE, W.; HEYMAN, J.; MAYER, A.; MIRCHI, A. GRANADOS-OLIVAS, A.; GANJEGUNTE, G.; GUTZLER, D.; PENNINGTON, D.; WARD, F.; CHAVIRA, L.; SHENG, Z.; KUMAR, S.; VILLANUEVA-ROSALES, N. & WALKER, W. The future of water in a desert river basin facing climate change and competing demands: a holistic approach to water sustainability in arid and semi-arid regions. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 46, n. 101336, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221458182300023X>. Acesso em: 16 jun. 2025.

HU, X. & LIMA, M. The association between maintenance and biodiversity in urban green spaces: A review. **Landscape and Urban Planning**, v. 251, n. 105153, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016920462400152X>. Acesso em: 16 jun. 2025.

IDHIRIJ, S. & WARD, F. Policy analysis for informing climate adaptation, environmental resilience, and irrigation demands in the Rio Grande Basin. **Journal of Environmental Management**, v. 365, n. 121528, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479724015147>. Acesso em: 16 jun. 2025.

JAVAN, K.; ALTAEE, A.; BANIHASHEMI, S.; DARESTANI, M.; ZHOU, J. & PIGNATTA, G. A review of interconnected challenges in the water–energy–food nexus: Urban pollution perspective towards sustainable development. **Science of The Total Environment**, v. 912, n. 169319, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723079494>. Acesso em: 16 jun. 2025.

KARADZHOV, V. How to create the best SWOT analysis. **International Journal of Research and Review**, v. 12, n. 1, 2025. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/387723931_How_to_Create_the_Best_SWOT_Analysis>. Acesso em: 22 set. 2025.

KAZEMI, F.; HOSSEINPOUR, N. & EBRAHIMIAN, M. People's preferences and perceptions toward low-input versus conventional park design approaches using 3D images and interview-based questionnaires. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 86, n. 128040, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S161886672300211X>. Acesso em: 16 jun. 2025.

KUCERA, D. & JENERETTE, G. Urban greenness and its cooling effects are influenced by changes in drought, physiography, and socio-demographics in Los Angeles, CA. **Urban Climate**, v. 52, n. 101743, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095523003371>. Acesso em: 16 jun. 2025.

MENDES, K.; SILVEIRA, R. & GALVÃO, C. Revisão integrativa: Método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. **Texto & Contexto - Enfermagem**, v. 17, n. 4, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/tce/a/XzFkq6tjWs4wHNqNjKJLkXQ/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 22 set. 2025.

PARK, Y.; ZHAO, Q.; GULDMANN, J. & WENTZ, E. A. Quantifying the cumulative cooling effects of 3D building and tree shade with high resolution thermal imagery in a hot arid urban climate. **Landscape and Urban Planning**, v. 240, n. 104874, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204623001937>. Acesso em: 16 jun. 2025.

PAUDEL, S. & STATES, S. L. Urban green spaces and sustainability: Exploring the ecosystem services and disservices of grassy lawns versus floral meadows. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 84, n. 127932, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866723001036>. Acesso em: 16 jun. 2025.

PRATT, B. A fine is more than a price: Evidence from drought restrictions. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 119, n. 102809, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009506962300027X>. Acesso em: 16 jun. 2025.

RAFI, Z.; KAZEMI, F. & TEHRANIFAR, A. Public preferences toward water-wise landscape design in a summer season. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 48, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866719300032>. Acesso em: 16 jun. 2025.

REBI, A.; EJAZ, I.; KHATANA, M.; ALVI, A.; IRFAN, M.; WANG, G.; GANG, Y.; WANG, L.; MENG, YU; GHAZANFAR, S. & ZHOU, J. Effect of irrigation levels on the physiological responses of petunia cultivars for selection. **Ecological Frontiers**, v. 44, n. 1, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1872203223000987>. Acesso em: 16 jun. 2025.

SCALTRITO, E.; CRISTIANO, G.; SDAO, A. E.; GRUDA, N. S.; LOCONSOLE, D. & LUCIA, B. Influence of water spraying intervals and indole-3-butyric acid concentrations on Salvia rooted cuttings quality in a closed aeroponics system. **Scientia Horticulturae**, v. 337, n. 113452, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423824006095>. Acesso em: 16 jun. 2025.

SHEEMA, N.; ZAFAR, S. UDDIN, G. & RASHID, A. A comprehensive review on the ethnobotanical, phytochemical, and pharmacological aspects of the genus *Malvastrum*. **Fitoterapia**, v. 171, n. 105666, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0367326X23002411>. Acesso em: 16 jun. 2025.

SILVA, C. L. C. O futuro das espécies de plantas invasoras na Caatinga: projeções climáticas e visualização interativa. 2024. [Dissertação – PRODEMA/UFRN]

SORIANO, P.; MORA, R.; ESTRLLES, E.; MARTÍNEZ-NIETO, M. Comparison of the Climate Change Tolerance of Native and Non-Native Species Used or Potentially Used as Ornamentals in Mediterranean Areas. **Horticulturae**. v. 10, n. 6, p. 620, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/10/6/620>. Acesso em: 16 jun. 2025.

SOUZA, M.; SILVA, M.; CARVALHO, R. Revisão integrativa: o que é e como fazer. **Einstein (São Paulo)**, 2010. v. 8, n. 1, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eins/a/ZQTBkVJZqcWrTT34cXLjtBx/?lang=en >. Acesso em: 22 set. 2025.

TABATABAIE, S.; LITT, J. & MULLER, B. Sidewalks, trees and shade matter: A visual landscape assessment approach to understanding people's preferences for walking. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 84, n. 127931, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1618866723001024>. Acesso em: 16 jun. 2025.

WETLANDS COMO ALTERNATIVA DE REVITALIZAÇÃO SOCIAL E AMBIENTAL POR MEIO DE JARDINS FILTRANTES NO CANAL DERBY-TACARUNA NO RECIFE

1 Maria Luisa Bandeira Lima da Rocha, 2 Gilka Torres Dueire Lins, 3 Julia Ximenes Botelho de Melo, 4 Maria Eduarda de Sousa Silva Donato, 5 Aline Aguiar Fernandes de Oliveira, 6 Robson José Silva, 7 Vicente de Paulo Silva

1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail:malubands9638@gmail.com; 2 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: gilka.tdlins@gmail.com; 3 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: julia.ximenes@ufrpe.br; 4 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: eduarda.donato@ufrpe.br; 5 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: aline.aguiar@ufrpe.br; 6 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: robson.josesilva@ufrpe.br; 7 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: vicente.psilva@ufrpe.br.

Palavras-chave: Canal Derby-Tacaruna; Revitalização urbana; *Wetlands* construídos.

Resumo

A degradação dos recursos hídricos em áreas urbanas tem impulsionado a busca por soluções sustentáveis para o tratamento de efluentes, como os *wetlands* construídos, com foco nos jardins filtrantes, como alternativa de revitalização social e ambiental no Canal Derby-Tacaruna, na cidade do Recife. A metodologia baseou-se em pesquisa bibliográfica, documental e estudo de caso, com definição de quatro indicadores qualitativos, sendo eles: aceitação social das tecnologias baseadas em infraestrutura verde, integração paisagística e valorização do espaço urbano, promoção da educação ambiental em espaços urbanos sustentáveis e a melhoria da qualidade de vida associada à requalificação ambiental urbana. Os resultados apontam que esses sistemas contribuem para a ampliação do uso social, requalificação do espaço urbano, além de se destacarem como soluções naturais com potencial educativo e a melhoria da qualidade da água. Conclui-se que os jardins filtrantes constituem uma solução multifuncional e de baixo custo, capaz de promover a melhoria da qualidade da água e a requalificação urbana, com impactos diretos na revitalização ambiental e social do Canal Derby-Tacaruna.

Introdução

A crescente degradação dos recursos hídricos devido à poluição urbana, agrícola e industrial pelo lançamento de poluentes, tem intensificado a busca por soluções sustentáveis e economicamente viáveis para o tratamento de efluentes e a recuperação de corpos d'água. Segundo dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (IBGE/PNAD, 2015), esse cenário está associado à precariedade do serviço de saneamento básico (Rezende *et al.*, 2021). Além disso, a geração de efluentes domésticos envolve desafios relacionados ao tratamento, descarte e reuso, destacando-se o lançamento irregular por meio de ligações clandestinas e desvios na rede de esgoto, o que ocasiona impactos negativos nos corpos hídricos, no solo e na biota aquática e terrestre, além de contribuir para a contaminação de águas subterrâneas (Chen *et al.*, 2018). Esse cenário é ainda mais crítico em canais urbanos, que frequentemente recebem efluentes sem tratamento e águas pluviais contaminadas, resultando em elevados níveis de poluição e degradação ambiental.

No âmbito normativo, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) estabelece normas, critérios e padrões com relação ao controle e à manutenção da qualidade do meio ambiente, visando o uso racional dos recursos ambientais, principalmente os hídricos (CONAMA, 2018). Dessa forma, a Resolução CONAMA nº 430 (Brasil, 2011) estabelece padrões para o lançamento de efluentes, enquanto a Resolução CONAMA nº 420 (Brasil, 2009) define critérios para a qualidade do solo e o gerenciamento de áreas contaminadas. Em escala global, a necessidade de aprimoramento da gestão de águas residuais é ainda mais evidente, especialmente em países em desenvolvimento, onde limitações estruturais reforçam a demanda por soluções eficientes e de baixo custo (Gholipour; Stefanakis, 2021; Sethi et al., 2023).

Diante da necessidade de atender às exigências legais estabelecidas pelas resoluções do CONAMA (Brasil, 2009; Brasil, 2011), e considerando a relevância da preservação dos corpos hídricos para a manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos (Sabei e Bassetti, 2013), torna-se essencial a adoção de tecnologias de tratamento que conciliam eficiência, baixo custo e adequação às condições locais. Nesse contexto, ganham destaque as tecnologias baseadas na natureza, que têm recebido crescente atenção por seu potencial em contribuir para a resolução da demanda por água de qualidade, ao mesmo tempo em que promovem benefícios ambientais e sociais (Al-Anzi; Fernandes, 2016; Kataki *et al.*, 2011; Stefanakis, 2020).

Desta forma, destacam-se as tecnologias baseadas na natureza como alternativas capazes de aliar eficiência, baixo custo e benefícios socioambientais. Entre essas soluções, os *wetlands* construídos (WCs) se destacam por sua capacidade de depuração hídrica, utilizando processos ecológicos para o tratamento de águas residuais (Silveira, 2017). Além disso, apresentam baixos custos operacionais e menor demanda energética quando comparados a sistemas convencionais, configurando-se como sistemas naturais de tratamento com elevada aplicabilidade em contextos urbanos (Perondi et al., 2020).

Dentre as tipologias de WCs, os chamados jardins filtrantes (JFs) representam uma modalidade particularmente relevante para contextos urbanos, pois aliam eficiência no tratamento de águas residuárias à função paisagista e educativa, sendo

aplicáveis tanto em escala descentralizada quanto em espaços públicos. Esses sistemas consistem em estruturas vegetadas que utilizam plantas aquáticas e substratos filtrantes para a remoção de poluentes, como matéria orgânica, nutrientes (nitrogênio e fósforo) e patógenos (Rezende *et al.*, 2021; Silveira *et al.*, 2017).

No contexto local, a cidade do Recife enfrenta desafios históricos relacionados à gestão hídrica e ao saneamento urbano. Como exemplo de aplicação bem-sucedida, destaca-se o Parque Urbano do Caiara, que utiliza jardins filtrantes para o tratamento das águas do Riacho do Cavouco, funcionando como infraestrutura verde multifuncional. A similaridade entre esse contexto e o Canal Derby-Tacaruna reforça a viabilidade da aplicação dessa solução no novo Jardim Saulo Santos.

A intervenção procura integrar um sistema de tratamento natural à malha urbana, promovendo a melhoria da água do rio Capibaribe e seus afluentes naquele trecho, ao mesmo tempo em que contribui para a requalificação paisagística e ambiental da área. Assim, além de promover a depuração das águas por meio de mecanismos sustentáveis, o JF poderá desempenhar um papel educativo e simbólico na reconexão da cidade com seus rios, reforçando a importância da infraestrutura verde como elemento central na construção de cidades resilientes e ecologicamente equilibradas (Sezerino *et al*., 2015; Silveira *et al.*, 2019).

Diante disso, o presente artigo tem como objetivo analisar o potencial dos *wetlands* construídos como alternativa de revitalização social e ambiental por meio de jardins filtrantes no canal Derby-Tacaruna, na zona norte do Recife, visando à melhoria da qualidade dos corpos hídricos urbanos por meio de processos naturais de tratamento, à integração da infraestrutura verde à paisagem urbana e à promoção da valorização ambiental e social da área.

Materiais e Métodos

A localização do Novo Jardim Saulo Santos, com as coordenadas geográficas 8°04’00’’S 34°53’52’’W, concentra-se no trecho entre a Avenida Agamenon Magalhães e a Rua Prefeito Jorge Martins (Figura 1). O local selecionado para realização do projeto é estratégico, pois corresponde ao ponto de deságue do canal Derby-Tacaruna e está situado nas proximidades de importantes hospitais da Ilha do Leite, o que torna ideal para promover a saúde ambiental, revitalizar um espaço público e melhorar a qualidade da água do Rio Capibaribe. A proposta é utilizar jardins filtrantes como forma de remediar os efluentes do Canal Derby-Tacaruna lançados sem tratamento no Rio Capibaribe. Segundo dados da Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC, 2020), “a bacia do rio Capibaribe apresenta uma área de 7.454,88 km² (7,58% da área do estado), abrangendo 42 municípios pernambucanos”, evidenciando ainda mais a importância da preservação desse corpo hídrico.

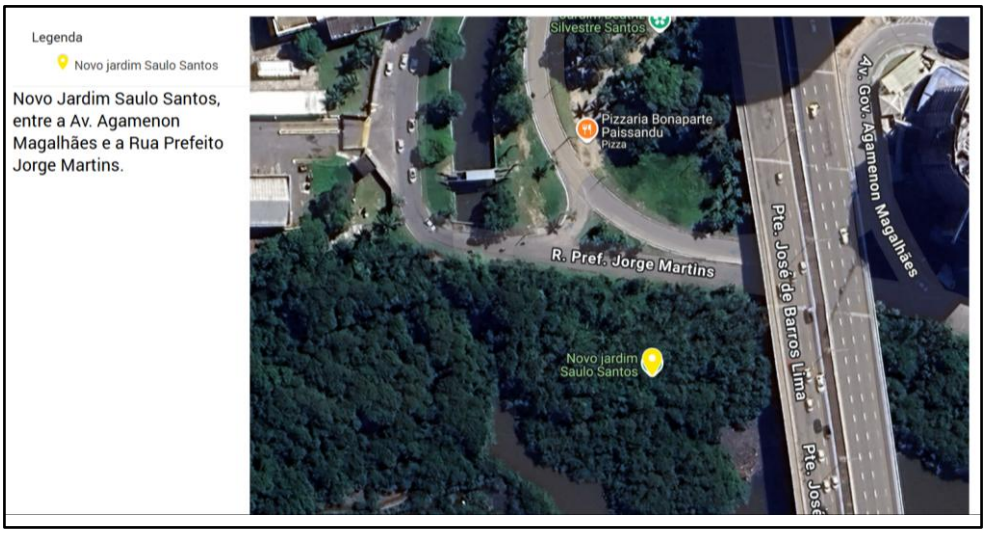


Figura 1. Localização do trecho proposto para revitalização
Fonte: Google Earth

A metodologia adotada neste trabalho possui caráter exploratório e descritivo, englobando pesquisa bibliográfica, documental e estudo de caso, com a definição de indicadores para os impactos positivos de uma *wetland*. A pesquisa bibliográfica foi fundamentada em publicações científicas entre 2019 e 2025, enquanto a análise documental considerou relatórios técnicos e materiais institucionais. A partir desse embasamento teórico, procedeu-se à análise de experiências aplicadas em distintos locais, buscando identificar padrões de implementação e benefícios associados. Para subsidiar essa avaliação, foram definidos indicadores qualitativos voltados à análise multidimensional dos sistemas. A definição dos indicadores deste estudo baseou-se em referenciais consolidados de avaliação da sustentabilidade, que consideram a integração entre as dimensões ambientais, sociais e institucionais.

O termo indicador significa descobrir, apontar, anunciar ou estimar. Os indicadores de desenvolvimento sustentável são amplamente utilizados como instrumento de apoio à análise e ao monitoramento das condições ambientais e da qualidade de vida, permitindo uma compreensão sistêmica das dinâmicas urbanas (IPARDES, 2010). Nesse contexto, documentos institucionais voltados à gestão ambiental destacam a importância da incorporação de critérios relacionados à responsabilidade socioambiental, governança e impactos territoriais na avaliação de projetos, ampliando a análise para além dos aspectos

exclusivamente técnicos (SEMAS, 2025). De forma complementar, estudos sobre administração pública e sustentabilidade reforçam a necessidade de abordagens integradas que considerem os efeitos sociais e ambientais das intervenções urbanas (VAN BELLEN, 2004).

Dessa forma, foram definidos quatro indicadores qualitativos voltados à análise multidimensional dos jardins filtrantes, sendo eles: aceitação social das tecnologias baseadas em infraestrutura verde, integração paisagística e valorização do espaço urbano, promoção da educação ambiental em espaços urbanos sustentáveis e melhoria da qualidade de vida associada à requalificação ambiental urbana. A aplicação desses indicadores permite não apenas avaliar a eficiência ambiental dos sistemas, mas também sua contribuição para a requalificação urbana e para a promoção de benefícios sociais no contexto das cidades, em específico o Canal Derby-Tacaruna.

Como estudo de caso, a experiência do Parque Caiara, localizado no bairro da Iputinga, no Recife, foi utilizado como embasamento prático para o desenvolvimento do projeto, que, segundo o Jornal do Commércio (2025), atualmente diminui em 79% o índice de poluição lançado no trecho do rio. Destaca-se que a configuração do Parque Caiara apresenta similaridade com a área de intervenção proposta, uma vez que o parque atua sobre o Riacho do Cavouco, corpo hídrico impactado por lançamentos de efluentes, assim como ocorre no Canal Derby-Tacaruna, reforçando a aplicabilidade da solução em contextos urbanos com características semelhantes.

A fase de síntese utilizou a técnica de engenharia de prompts, integrando parâmetros de engenharia ecológica, como a inserção de espécies macrófitas específicas (Canna sp., Cyperus sp. e Nymphaea sp.) e a simulação de balanço hídrico visual, a diretrizes de desenho urbano contemporâneo. O resultado constitui um prognóstico foto realista, servindo como ferramenta de proposta de revitalização do local de estudo, possibilitando a visualização dos potenciais impactos sociais e ambientais decorrentes da implantação dos jardins filtrantes no contexto urbano analisado.

Resultados e Discussão

Os indicadores qualitativos podem comunicar ou informar sobre o progresso em direção a uma determinada meta (HAMMOND, 1995). Dentro desse contexto, a aplicação dos quatro indicadores: aceitação social das tecnologias baseadas em infraestrutura verde, integração paisagística e valorização do espaço urbano, promoção da educação ambiental em espaços urbanos sustentáveis e a melhoria da qualidade de vida associada à requalificação ambiental urbana, constituem uma alternativa viável da aplicação do sistema *wetland* construído de jardins filtrantes para o canal Derby-Tacaruna.

Em relação à aceitação social das tecnologias baseadas em infraestrutura verde, com base nos estudos sobre infraestruturas verdes e no papel das *wetlands* construídas (jardins filtrantes) no contexto brasileiro, a análise dos resultados evidencia o potencial desses sistemas como estratégia integrada à revitalização urbana. Segundo Ventura (2023), a aceitação do público é uma questão fundamental para a implementação de *wetlands*. Mais do que soluções hidráulicas, os jardins filtrantes configuram-se como infraestruturas multifuncionais que associam o tratamento de efluente à qualificação do espaço público. Conforme Ventura (2023), esses sistemas reproduzem processos naturais de depuração, ao mesmo tempo em que promovem biodiversidade e reintroduzem dinâmicas ecológicas em áreas urbanas densamente ocupadas.

A aplicação prática dessas soluções demonstra resultados expressivos. No Parque Caiara, em Recife, foi registrada uma redução de 79% nos níveis de poluição hídrica (JORNAL DO COMÉRCIO, 2025), evidenciando a eficácia das *wetlands* construídas. Esse desempenho está associado à atuação conjunta de processos físicos, químicos e biológicos, responsáveis pela retenção de sedimentos, absorção de nutrientes e melhoria da qualidade da água. A utilização de macrófitas como Canna sp., Cyperus sp. e Nymphaea sp. desempenha papel central nesse processo, uma vez que essas espécies favorecem a formação de biofilmes e contribuem para a oxigenação da água, intensificando a degradação de poluentes e o equilíbrio do ecossistema aquático.

Além dos ganhos ambientais, observa-se elevada aceitação social do Parque Caiara, que passou a ser reconhecido como espaço de convivência, lazer e contato com a natureza pela população local. Considerando a similaridade entre o contexto do Riacho do Cavouco e o Canal Derby-Tacaruna, ambos impactados por efluentes urbanos, é consistente afirmar que a implantação de jardins filtrantes no novo Jardim Saulo Santos tende a alcançar nível semelhante de aceitação social, promovendo a reapropriação do espaço pela população e consolidando-se como um ambiente valorizado, acessível e integrado ao cotidiano urbano.

No que se refere à integração paisagística e valorização do espaço urbano, no âmbito social, a revitalização se manifesta na requalificação da paisagem urbana e na criação de espaços mais saudáveis e acessíveis. Esses ambientes favorecem o bem-estar, a convivência e a reconexão da população com a natureza, podendo também estimular atividades de lazer, turismo urbano e socialização, por meio da criação de áreas contemplativas, registros fotográficos e espaços de permanência.. No entanto, conforme discutido por Gearin *et al.* (2023), é fundamental considerar a participação comunitária no processo de implementação, a fim de evitar dinâmicas de eco-gentrificação. Nesse sentido, a integração paisagística e a valorização da identidade local tornam-se elementos essenciais para garantir que a intervenção seja inclusiva e socialmente sustentável.

Destaca-se que a área de intervenção está inserida em uma região estratégica da cidade, próxima ao polo médico do Recife, reconhecido como o segundo maior do Brasil, atrás apenas de São Paulo (Galvão, 2025). Essa característica confere ao local uma dinâmica territorial marcada por fluxos intensos e contínuos de usuários, incluindo pacientes, acompanhantes e profissionais de saúde provenientes tanto da capital quanto de outras regiões do estado e do país. Nesse contexto, a presença de um espaço público revitalizado, integrado à infraestrutura verde, apresenta potencial relevante para funcionar como ambiente de suporte urbano, proporcionando áreas de pausa, convivência e bem-estar em meio à rotina hospitalar, contribuindo para a humanização do entorno e ampliando a função social do espaço para além de sua dimensão ambiental.

Com base na análise dos indicadores e no estudo de caso, foi realizada uma simulação visual da proposta de revitalização para o Canal Derby-Tacaruna desenvolvida mediante modelagem generativa por Inteligência Artificial (IA). O procedimento metodológico partiu do estabelecimento de um gabarito espacial derivado de capturas do Google Street View, assegurando o realismo métrico e a manutenção da volumetria urbana preexistente.

Essa perspectiva é evidenciada na simulação fotorrealista do Canal Derby-Tacaruna, apresentada na Figura 2. O painel esquerdo, intitulado "Situação Atual", mostra a condição degradada do canal, com águas turvas de cor verde escura, margens secas e infraestrutura de concreto envelhecida. O painel direito, "Proposta com *Wetland* Construído", projeta a revitalização do espaço: águas limpas e transparentes, margens integradas ao paisagismo urbano e um ecossistema rico em macrófitas aquáticas filtrantes (Cyperus giganteus, Canna generalis, Nymphaea sp.), identificadas com seus nomes científicos e populares. Além disso, a imagem ilustra a apropriação social do espaço por meio de deques de madeira, pavimentação permeável e presença de pessoas em atividades de caminhada e pesquisa, demonstrando o impacto positivo da intervenção sobre a qualidade de vida e o engajamento comunitário.



Figura 2. Comparação visual entre a situação atual do Canal Derby-Tacaruna e a projeção de revitalização com *wetland* construído.
Fonte: Google Street View (base original) e IA Generativa via Assistente do Google (projeção visual), 2024.

De acordo com Carvalho *et al.* (2022), essas intervenções favorecem a redução da carga poluente, o aumento da biodiversidade e a criação de espaços ambientalmente mais resilientes. Além disso, a requalificação das margens e a integração com espaços públicos ampliam o potencial de uso e valorização dessas áreas, criando condições favoráveis para a reconexão entre a população e os corpos d'água. Essa abordagem integrada é apontada pelos autores como fundamental para o sucesso das ações de revitalização, uma vez que a melhoria ambiental contribui para a reaproximação social e para a ressignificação desses espaços na dinâmica urbana.

No que diz respeito à promoção da educação ambiental em espaços urbanos sustentáveis, os jardins filtrantes atuam como "laboratórios vivos" que rompem a invisibilidade dos processos de saneamento convencional. Segundo Rezende et al. (2021), esses sistemas não apenas tratam águas residuárias, mas funcionam como infraestruturas pedagógicas que facilitam a conscientização ambiental por meio da visualização direta dos ciclos biológicos. No contexto do Canal Derby-Tacaruna, a inserção de elementos educativos integrados à paisagem permite que estudantes e transeuntes compreendam o papel das soluções baseadas na natureza (SBN) na resiliência das cidades (Silveira et al., 2019).

Essa dimensão educativa é fundamental para a população, pois promove a transição de uma visão do canal como um "depósito de descartes" para a compreensão de um ecossistema funcional. Ao tornar tangível o processo de depuração hídrica, a educação ambiental estimula o sentimento de pertencimento e a zeladoria comunitária, fatores que reduzem drasticamente o vandalismo e o descarte irregular de resíduos sólidos. De acordo com Han, Huang e Jian (2025), a eficácia de longo prazo das *wetlands* construídas depende diretamente da percepção pública, portanto, o uso de deques e áreas de observação propostos na simulação visual não apenas facilita o lazer, mas estimula o engajamento comunitário e a alfabetização ecológica. Essa conexão emocional e informativa com o meio ambiente urbano reduz comportamentos de degradação, transformando um antigo ponto de poluição em um símbolo de gestão hídrica consciente, sustentável e, sobretudo, valorizado pela sociedade.

Quanto à melhoria da qualidade de vida associada à requalificação ambiental urbana, a redução da carga poluente no rio Capibaribe tende a ampliar as possibilidades de uso desse espaço pela população, tornando-o mais adequado para atividades de lazer e convivência. Nesse sentido, a melhoria da qualidade da água contribui diretamente para que o ambiente se torne mais atrativo e seguro para o passeio de famílias, favorecendo a reapropriação social de áreas anteriormente degradadas.

As *wetlands* desempenham um papel crucial na melhoria dos ambientes urbanos e no aumento da qualidade de vida dos moradores. Embora a maioria do público esteja integrado no ambiente proposto pelas *wetlands*, a participação em ações para promoção de educação ambiental com o objetivo de evitar ações de depredação desses ambientes ainda são baixas. Gênero, renda, nível de escolaridade e ocupação influenciam significativamente a conscientização pública e os comportamentos de conservação em diferentes estágios do ciclo de vida familiar. Os resultados deste estudo têm valor orientador para o planejamento da proteção do ambiente ecológico de zonas úmidas urbanas e para a formulação de políticas que visem aumentar a conscientização e a participação pública na proteção ecológica dessas áreas (Han; Huang; Jian, 2025).

Como parte indispensável do ecossistema urbano, os parques tornaram-se uma ligação entre a natureza e a sociedade e foram identificados pelas políticas de planejamento ambiental urbano como uma área prioritária. As *wetlands construídas*, oferecem locais para os humanos descansarem, se exercitarem, socializarem e relaxarem (Dai *et al.*, 2019). A complexidade das regulamentações para os tomadores de decisão e a implementação de políticas, bem como a diversidade de contextos sociais e ambientais nos parques nacionais de zonas úmidas, representam um dilema para a construção e gestão desses parques. Ao mesmo tempo, no processo de promoção da construção de parques de zonas úmidas na China, o governo tem aumentado constantemente a conscientização pública, e a demanda por serviços ecossistêmicos dos parques de zonas úmidas passou gradualmente de uma orientação econômica para uma orientação de bem-estar humano (Wang *et al*., 2022).

A pesquisa sobre os efeitos econômicos da restauração ecológica de zonas úmidas tem feito progressos notáveis em todo o mundo. Este campo não está apenas relacionado à proteção e restauração do meio ambiente natural, mas também tem um impacto profundo no desenvolvimento socioeconômico de regiões e até mesmo países (Yun.; Zhang; Zhang, 2024). Por meio de pesquisas, os estudiosos revelam continuamente a conexão intrínseca entre a restauração ecológica de zonas úmidas e os benefícios econômicos, o que fornece um forte suporte para a formulação de políticas e a gestão científica (Yang *et al.*, 2024). Nesse contexto, a presença de áreas verdes integradas à infraestrutura urbana pode potencializar benefícios associados ao bem-estar físico e psicológico dos usuários, especialmente ao proporcionar ambientes mais agradáveis, com contato com a natureza e condições favoráveis à permanência e ao descanso. Esses espaços atuam como elementos restauradores no ambiente urbano, contribuindo para a redução do estresse, melhoria da experiência cotidiana e fortalecimento das interações sociais. Assim, a requalificação ambiental promovida pelas *wetlands* ultrapassa a dimensão ecológica, assumindo também um papel relevante na promoção da saúde urbana e na ampliação da qualidade de vida em áreas densamente urbanizadas.

Considerações Finais

A análise realizada evidencia que a aplicação dos jardins filtrantes no Canal Derby-Tacaruna apresenta elevado potencial como estratégia integrada de revitalização ambiental e social em contextos urbanos. A partir dos indicadores qualitativos adotados (aceitação social das tecnologias baseadas em infraestrutura verde, integração paisagística e valorização do espaço urbano, promoção da educação ambiental em espaços urbanos sustentáveis e a melhoria da qualidade de vida associada à requalificação ambiental urbana.), observa-se que esses sistemas ultrapassam sua função primária de tratamento de efluentes, consolidando-se como infraestruturas multifuncionais capazes de gerar impactos positivos no território.

Nesse sentido, a transformação desses indicadores em impacto concreto manifesta-se na requalificação do espaço urbano, na ampliação do uso social das áreas revitalizadas e na valorização ambiental do entorno. A melhoria da qualidade da água, associada à redução da carga poluente no rio Capibaribe, tende a tornar o ambiente mais atrativo, seguro e propício para atividades de lazer e convivência, favorecendo a presença de famílias e a reapropriação de áreas deterioradas atualmente.

Além disso, os jardins filtrantes assumem papel relevante como instrumento de educação ambiental prática, ao possibilitar que a população vivencie, de forma direta, o funcionamento de tecnologias baseadas na natureza. Essa aproximação entre sociedade e sistema contribui para a disseminação do conhecimento, fortalecimento da consciência ambiental e estímulo à valorização de soluções sustentáveis no contexto urbano.

Por fim, destaca-se que a implementação de *wetlands* construídos em áreas estratégicas da cidade, como o Canal Derby-Tacaruna, reforça a importância da integração entre infraestrutura verde, planejamento urbano e bem-estar social. Dessa forma, tais intervenções configuram-se não apenas como soluções técnicas para o tratamento de águas residuárias, mas como elementos estruturantes na construção de cidades mais resilientes, inclusivas e ambientalmente equilibradas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao congresso pela oportunidade, à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e ao Departamento de Tecnologia Rural (DTR) pelo suporte institucional concedido. Expressam, ainda, seus agradecimentos aos professores Robson José e Vicente de Paulo pelas orientações e contribuições ao longo do desenvolvimento deste artigo, fundamentais para a condução e aprimoramento do trabalho.

Referências Bibliográficas

AL- ANZI, B; THOMAS, A.; FERNANDES, J. Lab scale assessment of power generation using pressure retarded osmosis from wastewater treatment plants in the state of Kuwait. **Desalination**, v. 396 p. 57–69, 2016.

APAC - AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. **Bacias hidrográficas - Rio Capibaribe**, 2020. Disponível em:https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas-rio-capibaribe/162-bacias-hidrograficas-rio-capibaribe/193-bacia-do-rio-capibaribe

BEZERRA, Onilda Gomes; MELO, Vera Lúcia Mayrinck de Oliveira. Valores da paisagem: os significados dos rios e manguezais da cidade do Recife. **Paisagem e ambiente**, n. 34, p. 95-106, 2014.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias. **Diário Oficial da União**. República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 dez. 2009.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União**. República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 16 maio 2011.

Calheiros, C.S.C.; V.S. Bessa, R.B.R. Mesquita, H. Brix, A.O.S.S. Rangel, P.M. L. Castro, Constructed wetland with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility, **Ecol. Eng.**, v. 79, p. 1-7, 2015. DOI: https:// doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.03.001.

CARVALHO, Maria Eduarda; ALENCAR, Juliana; RIBEIRO, Marcos Henrique Gomes. Revitalização de rios através de soluções baseadas na natureza: o Parque Caiara como elemento de recuperação do Rio Capibaribe, Recife-PE. In: ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS, 14.; **SIMPÓSIO DE REVITALIZAÇÃO DE RIOS URBANOS**, 4., 2022. Anais [...]. 2022.

CHEN, G.Q; TALEBI, S.L.; GRAS, M; WEEKS, S.; KENTISH, E. A review of salty waste stream management in the Australian dairy industry, **J. Environ. Manage.**, v. 224, p. 406–413, 2018.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **O que é o CONAMA?**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2018. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/o-que-e-o-conama.

Dai, P., Zhang, S., Chen, Z., Gong, Y., Hou, H., 2019. Perceptions of Cultural Ecosystem Services in Urban Parks Based on Social Network Data. **Sustainability 11**. https:// doi.org/10.3390/su11195386.

GALVÃO, Milena. **Recife, o coração que pulsa saúde no Nordeste**. Disponível em: <https://www.diariodepernambuco.com.br/200anos/2025/11/11699928-recife-o-coracao-que-pulsa-saude-no-nordeste.html>. Acesso em: 29 jan. 2026.

Gearin, E., Dunson, K. and Hampton, M. 'Greened out: mitigating the impacts of eco-gentrification through community dialogue'. **Architecture_MPS 25**, 1 (2023): 2. DOI: https://doi.org/10.14324/111.444.amps.2023v25i1.002.

Gholipour, A.; A.I. Stefanakis, A full-scale anaerobic baffled reactor and hybrid constructed wetland for university dormitory wastewater treatment and reuse in an arid and warm climate, **Ecol. Eng. 170** (2021) 106360, https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106360.

HAMMOND, A., *et al.* Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development. Washington, D.C.: **World Resources Institut**, 1995.

Han, H., Huang, Y. & Jian, Y. Public Perception and Conservation Behavior of Urban Wetland Ecosystem Services: a Study Based on Family Life Cycle Perspective. ***Wetlands*** **45**, 124 (2025). https://doi.org/10.1007/s13157-025-02007-6.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). Indicadores de Desenvolvimento Sustentável (IDS) 2010. Curitiba: **IPARDES**, 2010. Disponível em: https://www.ipardes.pr.gov.br/sites/ipardes/arquivos_restritos/files/documento/2024-04/IDS_2010.pdf

Kadlec, R.H.; R.L. Knight, J. Vyzmazal, H. Brix, P. Copper, R. Haberl, Constructed wetlands for pollution control (R. Kadlec & R. Knight, Eds.). **IWA publishing**, ISBN 1-900222-05-1, http://library.oapen.org/handle/20.500.12657/30978, 2000.

Kataki, S.; S. Chatterjee, M.G. Vairale, S.K. Dwivedi, D.K. Gupta, Constructed wetland, an eco-technology for wastewater treatment: a review on types of wastewater treated and components of the technology (macrophyte, biolfilm and substrate), **J.**

Environ. Manage. 283 (2021) 111986, https://doi.org/10.1016/j. jenvman.2021.111986.

MOHER D.; LIBERATI A.; TETZLAFF J.; ALTMAN D. G.; PRISMA Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **PLoS Med**. 2009 Jul 21;6(7):e1000097. Disponível em: https://doi.org/10.7326/0003-4819-151-4-200908180-00135.

NASCIMENTO, L. Projeto reduz em 79% poluição de riacho que deságua no Rio Capibaribe. Disponível em: <https://jc.uol.com.br/pernambuco/2025/07/18/projeto-reduz-em-79-poluicao-de-riacho-que-desagua-no-rio-capibaribe-no-recife.html>.

PERONDI, T. *et al.*. Wetlands construídos para o tratamento de esgoto doméstico: uma análise comparativa do custo do ciclo de vida. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 2, p. 175–189, abr. 2020.

Rezende, Diego César Veloso *et al.* Vantagens e desvantagens dos métodos Wetland e tanque de evapotranspiração: Revisão não sistemática Advantages and disadvantages of the Wetland and evapotranspiration tank methods: Non-systematic review. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 57248-57265, 2021.

Ruiz, Dagoberto; Gamboa, Sergio A.; Paniagua-Solar, Laura A.; Téllez, Nallely; Zayas, Teresa. Design of an efficient constructed wetland prototype for sustainable wastewater treatment in developing countries: A community case study in Mexico. **Journal of Water Process Engineering**, v. 69, p. 1-6, 2025.

SABEI, Thayze Rochele; BASSETTI, Fátima de Jesus. Alternativas ecoeficientes para tratamento de efluentes em comunidades rurais. **IX Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 9, n. 11, p. 487–503, 2013.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE DE PERNAMBUCO (SEMAS).
Agenda ASG: Ambiental, Social e Governança. Recife: **SEMAS**, 2025. Disponível em: https://semas.pe.gov.br/wp-content/uploads/2025/03/ASG.pdf

Sethi, S; R. Gupta, A. Bharshankh, R. Sahu, R. Biswas, Celebrating 50 years of microbial granulation technologies: from canonical wastewater management to bio-product recovery, Sci. **Total Environ**. 872 (2023) 162213, https://doi.org/ 10.1016/j.scitotenv.2023.162213

Sezerino, Pablo Heleno *et al.* Experiências brasileiras com wetlands construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: parâmetros de projeto para sistemas horizontais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 151–158, jan./mar. 2015. DOI: 10.1590/S1413-41522015020000096615.

Silveira, Elizandro Oliveira *et al.* Sistema integrado com microalgas e wetland construído de fluxo vertical no tratamento de efluentes urbanos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 02, p. 305-313, 2019.

Stefanakis, A.I. Constructed wetlands for sustainable wastewater treatment in hot and arid climates : opportunities, Challenges and Case Studies in the Middle East, **Water 12** (2020) 1665, https://doi.org/10.3390/w12061665.

VAN BELLEN, H. M.. Indicadores de sustentabilidade: um levantamento dos principais sistemas de avaliação. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 2, n. 1, p. 01–14, mar. 2004.

VENTURA, Thaís Calixtro da Rocha. **Guia para wetlands urbanas de águas pluviais no Brasil.** 2023.

Wang, R., Zhang, Y., Zhang, H., Yu, H., 2022a. Social Value Assessment and Spatial Expression of National Park Ecosystems Based on Residents' Perceptions. **Sustainability 14**. https://doi.org/10.3390/su14074206.

Yang, D.; Yang, Q.; Tong, Z.; Du, W.; Zhang, J. Coupling coordination analysis of production, living, and ecological spaces in wetlands: A case study of Xianghai Wetland nature reserve, China. **Ecol. Indic**. 2024, 158, 111578.

Yun, K.; Zhang, M.; Zhang, Y. Investigating the coupled coordination of improved ecological environment and socio-economic
development in alpine wetland areas: A case study of southwest China. **Ecol. Indic**. 2024, 160, 111740.

PAVIMENTOS PERMEÁVEIS: UMA ALTERNATIVA PARA REDUZIR TEMPERATURA EM CENTROS URBANOS

1 Rodrigo Xavier Cabeda, 2 Fabiana Campos Pimentel, 3 Gabrielle de Barcelos Soares, 4 Francisco Paim de Freitas Neto, 5 Luize Baldoni de Oliveira, 6 Eduarda dos Santos Schossler, 7 Rutineia Tassi,

1 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: rodrigoxcabeda@gmail.com; 2 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: fabiana.pimentel@acad.ufsm.br; 3 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: gabrielle.barcelos@acad.ufsm.br; 4 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: francisco.freitas@acad.ufsm.br; 5 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail:oliveira.luize@acad.ufsm.br; 6 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: eduarda.schossler@acad.ufsm.br; 7 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: rutineia@gmail.com;

Palavras-chave: Pavimentos Permeáveis; Ilhas de Calor; Análise Térmica.

Resumo

Grande parte da população mundial reside em áreas urbanas, e a expansão da urbanização intensifica alterações no uso e ocupação do solo, como a impermeabilização de superfícies e a redução da cobertura vegetal, favorecendo a formação das Ilhas de Calor Urbano (ICU). Nesse contexto, a utilização de pavimentos permeáveis apresenta-se como potencial para a mitigação do aquecimento superficial e para a melhoria do confortamento térmico em ambientes urbanos, além de contribuir também para a redução de alagamentos. Neste estudo foi avaliado o comportamento térmico superficial de quatro diferentes pavimentos permeáveis instalados em um estacionamento experimental no campus Sede da Universidade Federal de Santa Maria, em comparação com um pavimento asfáltico convencional. Os dados horários de temperatura superficial destes pavimentos foram coletados entre agosto de 2022 e janeiro de 2023 por meio de sensores. As análises consideraram as temperaturas superficiais máximas, mínimas, médias e as amplitudes térmicas diárias dos diferentes pavimentos, para quatro dias representativos do período. Os resultados mostraram que o asfalto convencional apresentou as maiores temperaturas superficiais e as maiores amplitudes térmicas diárias, evidenciando maior capacidade de absorção e liberação de calor. Os pavimentos permeáveis apresentaram desempenho térmico favorável, com temperatura superficial de 2,0ºC e 4,5ºC inferior ao pavimento convencional, em média. Dentre os pavimentos permeáveis avaliados, os melhores resultados em termos de temperatura superficial foram obtidos para a estrutura que continha vegetação.

Introdução

Grande parte da população mundial reside em áreas urbanas, e estima-se que até 2050, cerca de 68% da população mundial passe a residir nesses espaços (ONU, 2018). Segundo Zezzo et al. (2025), o processo de urbanização promove alterações no uso e na ocupação do solo, sobretudo por meio da impermeabilização das superfícies, da construção de edificações e da supressão da vegetação. Essas mudanças afetam a dinâmica ambiental urbana, com repercussões na qualidade do ar e, principalmente, nas condições térmicas locais, contribuindo para a modificação do microclima urbano.

Entre as principais consequências dessas alterações, destaca-se a formação das Ilhas de Calor Urbano (ICU), fenômeno no qual áreas urbanas apresentam temperaturas do ar e da superfície superiores às observadas em áreas menos urbanizadas (Joshi et al. 2026). Autores como Shamsaei et al. (2024) destacam que essa diferença térmica pode variar entre 5ºC e 15ºC, configurando um importante desafio ambiental, especialmente em cidades submetidas a processos desordenados de urbanização. As causas da ICU são multifatoriais e incluem elevada densidade construtiva, escassez de áreas verdes e as características dos materiais empregados na pavimentação urbana (Zezzo et al. 2025). Entre esses materiais, o asfalto é amplamente utilizado em pavimentação, devido à sua facilidade de execução e manutenção, podendo ocupar, segundo Santamouris (2020), até 40% do ambiente urbano. No entanto, em razão do seu baixo albedo, esse material absorve grande parte da radiação solar incidente, o que eleva sua temperatura superficial a valores que podem ultrapassar 70ºC em dias de verão, contribuindo para a intensificação das ICU (Yinghong; Hiller, 2014; Santamouris, 2020).

Uma das estratégias empregadas para reduzir a absorção da radiação solar pelos pavimentos asfálticos e, consequentemente, mitigar o aquecimento superficial em áreas urbanas, consiste no aumento da sua refletância (Shamsaei et al. 2024). Chen et al. (2017), por exemplo, observaram que o aumento de 0,1 no albedo do pavimento convencional pode reduzir a temperatura superficial em até 2,1 ºC, em razão da maior radiação solar refletida pelo material. No entanto, embora essa estratégia apresente benefícios térmicos, pavimentos excessivamente refletivos podem gerar impactos sobre a segurança viária, como ofuscamento e possíveis alterações na resistência ao escorregamento, o que favorece a ocorrência de derrapagens de veículos (Maria et al., 2013; Mohajerani et al., 2017). Além disso, Li et al. (2025) destacam que que os efeitos de pavimentos excessivamente reflexivos nem sempre são estimados com precisão, uma vez que parte da literatura adota simplificações quanto ao comportamento óptico dos materiais, o que pode levar à subestimação de seus efeitos no ambiente urbano. De forma complementar às estratégias baseadas no aumento da refletância, os pavimentos permeáveis também se constituem em uma alternativa de mitigação do aquecimento superficial urbano, pois contribuem para a modulação do balanço térmico por meio da umidade e da evaporação (Lamberti, 2019). Em Santa Maria, no estado do Rio Grande do Sul, Lamberti (2019) observou que, em dias quentes, os pavimentos permeáveis atingiram temperaturas superficiais de 55ºC, enquanto blocos do tipo pisograma mantiveram valores em torno de 44ºC, evidenciando a contribuição da cobertura vegetal para a atenuação da temperatura superficial em áreas urbanas.

Embora o desempenho hidrológico dos pavimentos permeáveis tenha sido amplamente investigado pela literatura, ainda são limitados os estudos que avaliaram seu comportamento térmico em condições reais de operação, especialmente a partir de comparações diretas entre diferentes tipos de revestimento instalados sob a mesma estrutura experimental. Neste trabalho, é apresentado o resultado de uma análise do desempenho térmico (temperatura de superfície) de quatro pavimentos permeáveis localizados em um estacionamento localizado no Campus Sede da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em comparação às condições térmicas de um pavimento asfáltico convencional, a fim de discutir o potencial deste tipo de solução na mitigação do aumento da temperatura superficial em áreas urbanas.

Material e Métodos

Os dados analisados neste estudo, correspondem às temperaturas superficiais medidas em quatro tipos de revestimentos de pavimentos permeáveis. O estacionamento onde se encontram os pavimentos permeáveis faz parte da infraestrutura do Campus Sede da UFSM, e possui área total de 1285 m², sendo 100 m² desta área destinada a oito vagas de carro, com quatro tipos de pavimentos permeáveis (duplicatas). Maiores informações sobre todo o processo de construção, materiais, e ensaios hidráulicos e mecânicos podem ser encontradas em Lamberti (2019).

A execução dos pavimentos permeáveis nas vagas ocorreu em 2018 (Figura 1), com a utilização de uma barreira estrutural física que atua como separador dos quatro diferentes tipos de pavimentos. Os revestimentos utilizados nos pavimentos permeáveis foram: blocos intertravados de concreto permeável (I.P.), blocos intertravados de concreto convencional (I.C.), concreto permeável (C.P.) e blocos do tipo pisograma com plantio de grama (P.G.). As Figuras 2 e 3, apresentam os quatro revestimentos de pavimentos analisados.

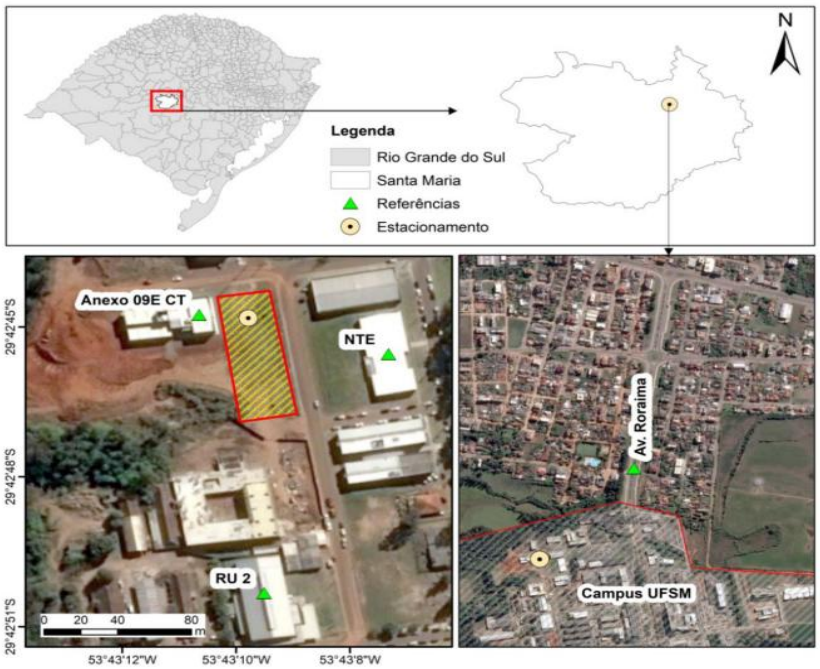


Figura 1: Mapa de localização do estacionamento com vagas experimentais.
Fonte: Lamberti (2019)



Figura 2: Blocos intertravados de concreto permeável (a) e convencional (b).
Fonte: Autores (2026)



Figura 3: Concreto permeável (a) e bloco pisograma(b).
Fonte: Autores (2026)

O monitoramento da temperatura superficial foi realizado com sensores DS18B20, conectados a placas microcontroladoras Arduino Uno V3, posicionados ao centro de cada revestimento, conforme ilustrado na Figura 4. As medições foram registradas com intervalo temporal de uma hora. Além dos quatro revestimentos de pavimentos experimentais, também foi monitorada a temperatura superficial de um pavimento de asfalto convencional em área adjacente ao estacionamento. Este pavimento foi tomado como referência. Para fins de comparação, a temperatura superficial dos pavimentos também foi confrontada com a temperatura do ar registrada na estação meteorológica A803 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a aproximadamente 2 km da área experimental.

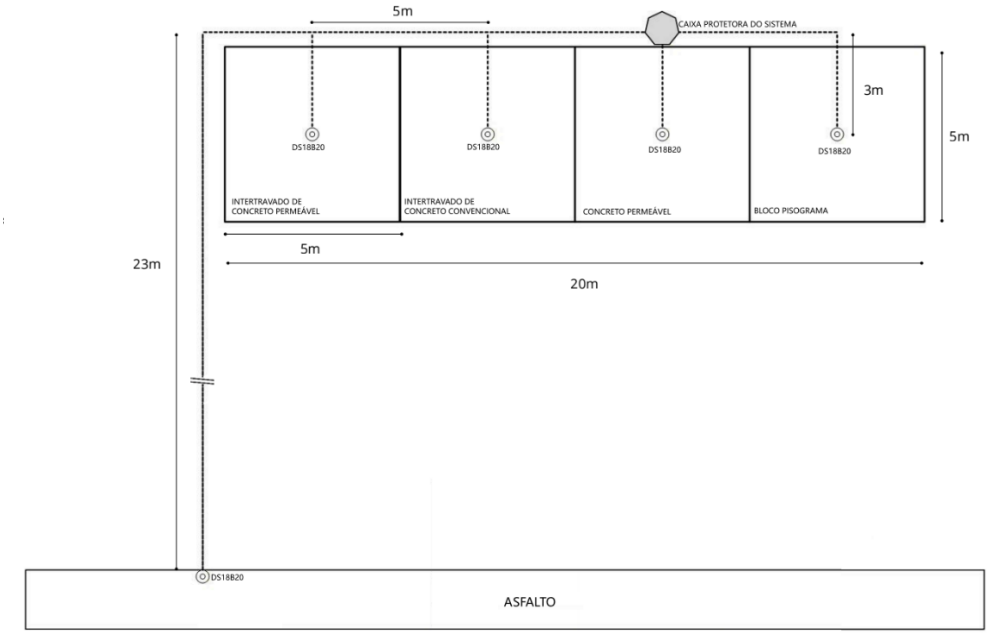


Figura 04: Croqui da instalação
Fonte: Autores (2026)

Após a etapa de coleta, entre agosto de 2022 e janeiro de 2023, os dados foram submetidos a tratamento e filtragem, uma vez que o banco de dados reunia um grande volume de registros, provenientes de múltiplos dias de monitoramento, além de eventuais falhas de medição. Para essa etapa, foram desenvolvidos *scripts* em linguagem *Python*, com o objetivo de identificar valores ausentes, remover registros inconsistentes e selecionar apenas os períodos com séries temporais completas e confiáveis para a análise térmica, permitindo a interpretação correta dos resultados.

Para fins de discussão dos resultados, foram selecionados quatro dias representativos entre os meses de setembro e dezembro de 2022 (30/09/2022, 20/10/2022, 06/11/2022 e 21/12/2022), de modo a contemplar a transição entre as estações e diferentes condições térmicas. O desempenho térmico de cada pavimento foi avaliado a partir da amplitude térmica diária das temperaturas superficiais registradas nos dias selecionados, e a partir das médias observadas ao longo de todo o período de monitoramento. Essas métricas permitiram comparar o comportamento térmico dos diferentes materiais de revestimento em relação ao aquecimento superficial e à variação da temperatura ao longo do tempo. Para o cálculo da amplitude térmica (A) e da temperatura média ($\bar{x}$), foram utilizadas as Equações 1 e 2, respectivamente

$$A = T_{máx} - T_{mín} \quad (01)$$

Onde: A é a amplitude térmica, $T_{máx}$ é a temperatura máxima registrada no dia e $T_{mín}$ é a temperatura mínima registrada.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \quad (02)$$

Onde: x_i representa cada valor individual de temperatura no período e n é o número total de dados.

Resultados e Discussão

Os registros horários de temperatura superficial dos revestimentos dos pavimentos permeáveis, pavimento asfáltico convencional e temperatura do ar registrada na estação A803 do INMET são apresentados nas Figuras 5 a 8, para os dias representativos avaliados. As temperaturas máximas, mínimas e as amplitudes térmicas diárias obtidas para cada pavimento estão sintetizadas na Tabela 1.

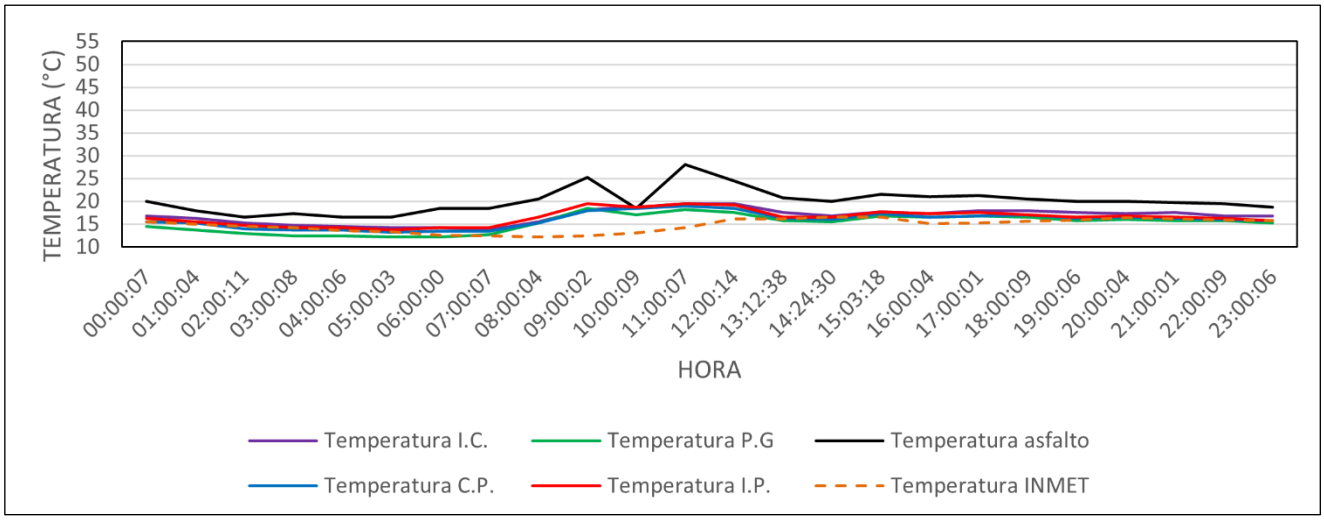


Figura 5: Perfis horários das temperaturas superficiais dos pavimentos e da temperatura do ar em 30/09/2022. Fonte: Autores (2026)

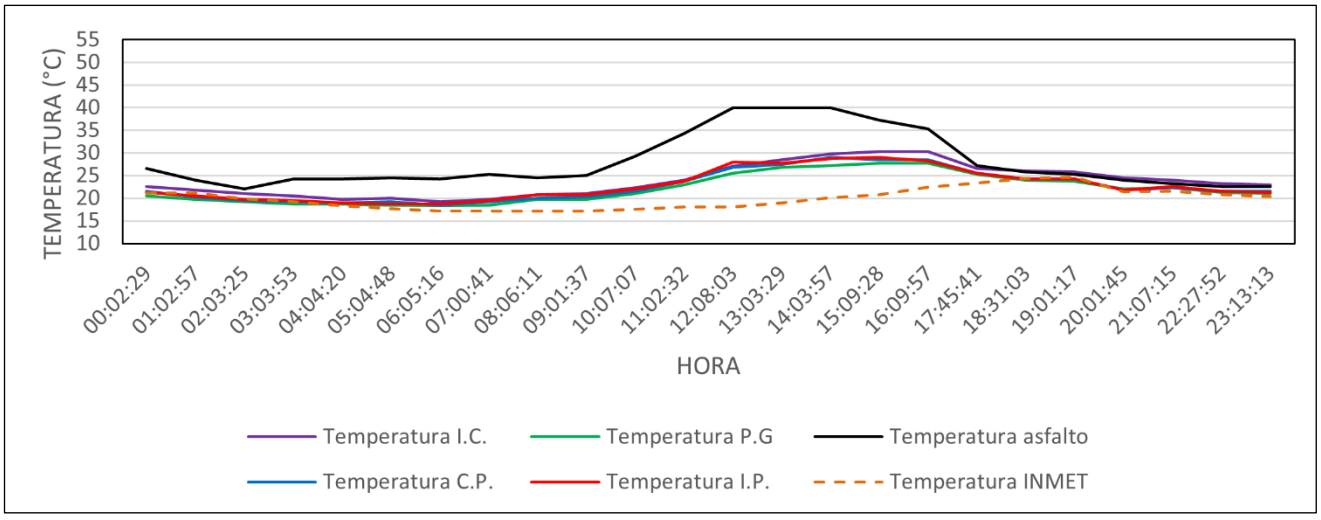


Figura 6: Perfis horários das temperaturas superficiais dos pavimentos e da temperatura do ar em 20/10/2022. Fonte: Autores (2026)

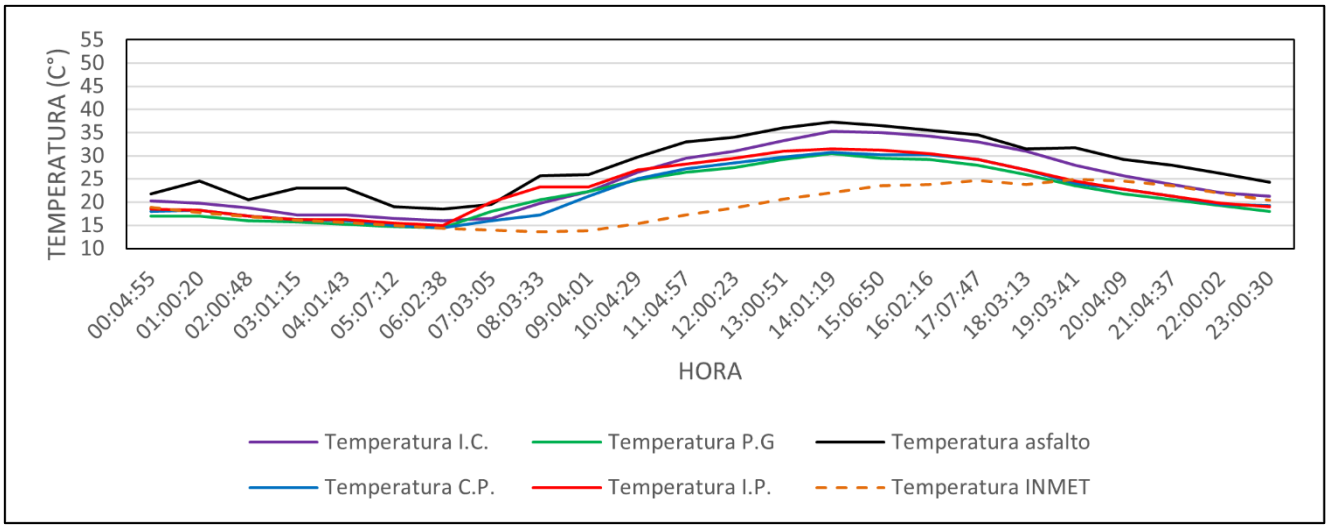


Figura 7: Perfis horários das temperaturas superficiais dos pavimentos e da temperatura do ar em 06/11/2022.
Fonte: Autores (2026)

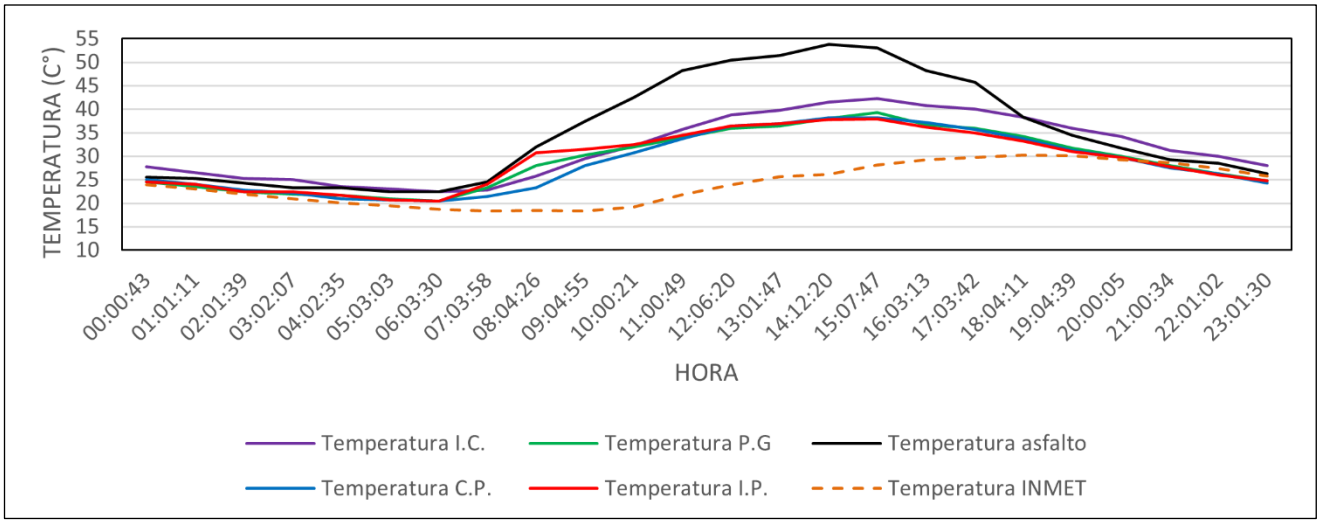


Figura 8: Perfis horários das temperaturas superficiais dos pavimentos e da temperatura do ar em 21/12/2022.
Fonte: Autores (2026)

Data		I.C.	P.G.	Asfalto	C.P.	I.P.	Ar
30/09/2022		19,5	18,5	25,25	19	19,5	16,5
20/10/2022	**T. Máxima**	30,25	27,75	37,25	29	29	24,6
06/11/2022	**(°C)**	35,25	30,5	37,25	30,75	31,5	24,7
21/12/2022		42,25	39,25	53,75	38,25	38	30,2
30/09/2022		13,75	12,25	16,5	13,25	13,75	12,2
20/10/2022	**T. Mínima**	19,25	18,25	24,25	18,5	18,75	17,1
06/11/2022	**(C°)**	16	14,5	18,5	14,5	15	13,6
21/12/2022		22,5	20,5	22,5	20,5	20,5	18,4
30/09/2022		5,75	6,25	8,75	5,75	5,75	4,3
20/10/2022	**Amplitude**	11	9,5	13	10,5	10,25	7,5
06/11/2022	**(C°)**	19,25	16	18,75	16,25	16,5	11,1
21/12/2022		19,75	18,75	31,25	17,75	17,5	11,8

Tabela 1: Temperaturas máximas, mínimas e amplitudes térmicas diárias dos pavimentos permeáveis, do asfalto convencional e da temperatura do ar (A803/INMET) nos quatro dias selecionados.
Fonte: Autores (2026)

Considerando os quatro dias analisados, foi observado um comportamento térmico semelhante entre as superfícies dos pavimentos ao longo do ciclo diurno, com elevação das temperaturas durante a manhã, ocorrência dos valores máximos entre o fim da manhã e o período da tarde e posterior redução no período da noite.

Em todos os dias avaliados, o asfalto convencional apresentou as maiores temperaturas máximas diárias, variando de 25,25 °C em 30/09/2022 a 53,75 °C em 21/12/2022, com temperaturas sempre acima daquelas observadas nos pavimentos permeáveis, e também superior à temperatura do ar, fenômeno mais evidente nos dias mais quentes. Em 21/12/2022, por exemplo, a temperatura máxima superficial do asfalto foi 11,50 °C superior à temperatura do bloco intertravado de concreto convencional, 14,50 °C superior à temperatura do bloco vegetado com grama, 15,50 °C superior à temperatura do pavimento com concreto permeável e 15,75 °C superior à temperatura do bloco intertravado permeável. Em relação à temperatura do ar, a temperatura máxima do asfalto superou os registros da estação A803 em todos os dias avaliados, o que evidencia seu maior potencial de aquecimento superficial.

Entre os revestimentos permeáveis, os menores valores de temperatura superficial máxima foram observados, em geral, nos materiais com maior permeabilidade ou com a presença de cobertura vegetal. O bloco do tipo pisograma com vegetação apresentou a menor temperatura máxima em três dos dias representativos: 30/09/2022 (18,50 °C), 20/10/2022 (27,75 °C) e 06/11/2022 (30,50 °C). Apenas no dia 21/12/2022 o menor valor de temperatura foi registrado no bloco intertravado permeável (38,00 °C), quando o pavimento com vegetação registrou 39,25 °C. O concreto permeável também apresentou desempenho térmico com menor potencial de temperatura superficial, em comparação ao pavimento asfáltico convencional, com temperaturas máximas de 19,00 °C, 29,00 °C, 30,75 °C e 38,25 °C nas quatro datas analisadas. Em contraste, o bloco intertravado de concreto convencional apresentou comportamento intermediário, com temperaturas máximas superiores aos demais revestimentos permeáveis, em três dos quatro dias analisados.

As amplitudes térmicas acompanharam, de modo geral, o mesmo padrão das temperaturas superficiais. O asfalto convencional apresentou as maiores amplitudes térmicas em 30/09/2022 (8,75 °C), 20/10/2022 (13,00 °C) e 21/12/2022 (31,25 °C), indicando maior oscilação térmica diária e maior suscetibilidade ao aquecimento sob incidência solar e também de liberação de calor. Em 06/11/2022, contudo, a maior amplitude foi observada no bloco intertravado de concreto convencional (19,25 °C), valor ligeiramente superior ao do asfalto convencional (18,75 °C). Ainda assim, os revestimentos permeáveis tiveram melhor desempenho térmico e, em geral, amplitudes inferiores às do asfalto, sobretudo nos dias de maior aquecimento.

Em conjunto, os resultados indicaram que o asfalto convencional apresentou maior capacidade de aquecimento superficial e maior variabilidade térmica diária, em comparação com os demais materiais avaliados. Por outro lado, o concreto permeável, o bloco intertravado permeável e, sobretudo, o bloco do tipo pisograma vegetado apresentaram um viés para manter temperaturas máximas mais baixas e amplitudes térmicas menores, o que sugere comportamento térmico mais favorável. No caso do bloco do tipo pisograma, esse desempenho é coerente com a presença de cobertura vegetal, que, conforme discutido por Lamberti (2019), pode favorecer processos associados à evapotranspiração e contribuir para a redução da temperatura superficial.

De forma semelhante, o concreto permeável e os revestimentos com maior porosidade podem apresentar resposta térmica distinta em razão da sua estrutura interna, embora esses mecanismos não tenham sido medidos diretamente neste estudo. Sob o ponto de vista aplicado, os resultados apontam que superfícies permeáveis podem contribuir para a atenuação do aquecimento superficial em áreas urbanas, especialmente em comparação com o asfalto convencional. No entanto, essa interpretação deve ser restrita ao comportamento térmico superficial observado no estacionamento avaliado, não sendo suficiente, por si só, para inferir efeitos sobre o conforto térmico humano ou sobre a intensidade das ilhas de calor urbano em escala mais ampla.

Além do desempenho térmico, a aplicação desses materiais deve considerar suas limitações estruturais. Segundo Lamberti (2019), o concreto permeável, material também presente nos blocos intertravados permeáveis, possui baixa resistência e maior deformabilidade sob cargas elevadas, em razão de sua composição com pouca ou nenhuma areia. Por esse motivo, seu uso tende a ser mais adequado em áreas de tráfego leve, como estacionamentos e calçadas. Ainda assim, sua porosidade, associada à possibilidade de retenção temporária de umidade, pode contribuir para modular a resposta térmica da superfície. No caso do bloco do tipo pisograma, a presença de vegetação reforça esse potencial, configurando uma alternativa promissora para redução do aquecimento superficial em superfícies urbanas de baixa solicitação mecânica.

Considerações Finais

Este estudo teve como objetivo avaliar o comportamento térmico superficial de quatro tipos de revestimento permeáveis de pavimentos instalados em um estacionamento, incluindo blocos intertravados de concreto permeável e de concreto convencional, concreto permeável e bloco do tipo pisograma vegetado com grama. De modo geral, os resultados mostraram que esses revestimentos apresentaram desempenho térmico mais favorável do que o asfalto convencional presente em área próxima à área experimental.

A análise dos dados obtidos em quatro dias representativos de 2022 permitiu identificar diferenças consistentes entre os materiais avaliados. Em geral, os blocos do tipo pisograma estiveram entre os revestimentos com melhor desempenho térmico, apresentando, em vários dos dias analisados, temperaturas superficiais mais baixas e valores mais próximos da temperatura do ar registrada pela estação do INMET. O concreto permeável e o bloco intertravado permeável também apresentaram desempenho superior ao do asfalto, enquanto o bloco intertravado de concreto convencional exibiu comportamento intermediário entre os materiais experimentais. Além disso, o asfalto convencional apresentou os maiores valores de temperatura superficial máxima em todos os dias analisados e, de modo geral, as maiores amplitudes térmicas diárias, alcançando 31,25 °C. Esse comportamento evidencia maior suscetibilidade ao aquecimento e maior oscilação térmica diária. Em contraste, os revestimentos permeáveis, especialmente o bloco do tipo pisograma, tenderam a apresentar temperaturas máximas inferiores e maior estabilidade térmica ao longo do dia, configurando resposta térmica superficial mais favorável.

No contexto prático, os resultados sugerem que a substituição de superfícies convencionais por soluções permeáveis, especialmente aquelas associadas à vegetação, pode constituir uma alternativa promissora para reduzir o aquecimento superficial em áreas urbanas. Contudo, a aplicação desses materiais deve considerar limitações estruturais específicas. No caso do concreto permeável, por exemplo, sua menor resistência mecânica recomenda seu uso preferencial em áreas de tráfego leve, como estacionamentos e calçadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), por meio do Centro de Tecnologia, pelo suporte fornecido, bem como à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio institucional e financeiro (Código de Financiamento 001), e ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa concedida à última autora, por meio do processo nº 310073/2025-1. Os autores gradecem, ainda, o empenho e a colaboração dos membros do Grupo de Pesquisas em Modelagem Hidroambiental e Ecotecnologias.

Referências Bibliográficas

CHEN, J.; WANG, H.; ZHU, H. Analytical approach for evaluating temperature field of thermal modified asphalt pavement and urban heat island effect. *Building and Environment*, 2017. Acesso em: 19 jan. 2022.

JOSHI, T.; MACHCHHOVA, J.; DAVE, U.; COSPTEL, P.; SHAH, V. Mitigating Urban Heat Island Effects Through Thermally Efficient Concrete Paver Blocks for Sustainable Infrastructure. *Infrastructures*, 2026, 11, 5. Acesso em: 13 mar. 2026.

LAMBERTI, L. A. Desempenho hidrológico de revestimentos de concreto de cimento Portland aplicados a pavimentos permeáveis. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019. Acesso em: 21 jan. 2026.

LI, H.; XIE, N.; ZHANG, X.; SUN, L.; HARVEY, J.; WANG, L. Investigation on mixed reflection behavior of cool pavement coating and its impact on safety of road light environment. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2025. Acesso em: 21 jan. 2026.

MOHAJERANI, A.; BAKARIC, J.; JEFFREY-BAILEY, T. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, v. 197, p. 522–538, 2017. Acesso em: 24 mar. 2026.

SANTAMOURIS, M. Recent progress on urban overheating and heat island research: integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*, v. 207, p. 109482, 2020. Acesso em: 24 mar. 2026.

SHAMSAEI, M.; CARTER, A.; VAILLANCOURT. Using construction and demolition waste materials to alleviate the negative effect of pavements on the urban heat island: a laboratory, field, and numerical study. *Journal of Cleaner Production*, 2024. Acesso em: 19 jan. 2026.

UNITED NATIONS. The world's cities in 2018: data booklet. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. New York, 2018.

V.D. Maria, M. Rahman, P. Collins, G. Dondi, C. Sangiorgi, Urban Heat Island Effect: Thermal Response from Different Types of Exposed Paved Surfaces, Int. J. Pavement Res. Technol. 6 (2013) 414–422. Acesso em: 13 mar. 2026.

XIE, N.; LI, H.; ABDELHADY, A.; HARVEY, J. Laboratory investigation on optical and thermal properties of cool pavement nano-coatings for urban heat island mitigation. *Building and Environment*, v. 147, p. 231–240, 2019. Acesso em: 19 jan. 2026.

YINGHONG, Q; HILLER, J. Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development. Energy Build. 85 (2014) 389–399. Acesso em: 13 mar. 2026.

ZEZZO, et al. Exploring the urban heat island phenomenon in a tropical medium-sized city: insights for sustainable urban development. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2025. Acesso em: 19 jan. 2026.

ZHENG, M.; TIAN, Y.; HE, L. Analysis on environmental thermal effect of functionally graded nanocomposite heat reflective coatings for asphalt pavement. *Coatings*, v. 9, n. 3, p. 178, 2019. Acesso em: 19 jan. 2026.

INFRAESTRUTURA VERDE URBANA E CLIMA: LACUNAS DE PESQUISA E OPORTUNIDADES PARA FORMULAÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS EM CONTEXTOS TROPICAIS

1 Marcos Lázaro Guimarães; 2 Francisco Lledo dos Santos; 2 Rodrigo Bruno Zanin; 3 Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira

1 Mestre, Universidade do Estado de Mato Grosso, marcaolazaro@unemat.br, 2 Doutor, Universidade do Estado de Mato Grosso, franciscolledo@unemat.br, rodrigo.zanin@unemat.br; 3 Doutor(a), Universidade Federal de Mato Grosso, mcjanj@gmail.com

Palavras-chave: Green Infrastructure; Blue Infrastructure, Metadados.

Resumo

Este estudo analisa a produção científica global sobre Green Infrastructure, Blue Infrastructure, Urban Climate, Local Climate Zones (LCZ) e Urban Infrastructure, entre os anos de 2015 e 2026. A pesquisa utilizou uma abordagem quantitativa fundamentada na análise de metadados das bases de web site como Scopus e Web of Science. A metodologia envolveu o processamento de 273 registros por meio do software RStudio com o pacote bibliometrix e da ferramenta Biblioshiny, permitindo identificar padrões, tendências e relações temáticas. Os resultados revelam um crescimento expressivo das publicações a partir de 2021 e pico registrado em 2025, com concentração em poucos países, especialmente a China que lidera a produção mundial em volume, enquanto o Reino Unido se destaca pelo alto impacto de suas citações, ainda que o impacto científico não acompanha diretamente o volume de produção. Observou-se que o campo evoluiu de diagnósticos técnicos para o suporte estratégico em políticas de sustentabilidade urbana. Conclui-se que o tema apresenta maturação rápida e é essencial para o planejamento de cidades resilientes e sustentáveis.

Introdução

Nas últimas décadas, estudos que tratam de temas como: *Green Infrastructure, Blue Infrastructure, Urban Climate, Local Climate Zones (LCZ) e Urban Infrastructure*, têm ganhado espaço, acompanhando o debate crescente sobre cidades mais sustentáveis e os efeitos ambientais associados ao avanço da urbanização. Embora esse movimento não seja novo, ele aumentou à medida que diferentes áreas do conhecimento passaram a olhar para o clima urbano e suas implicações com maior atenção.

Nesse contexto, bases de dados como Scopus e Web of Science (WoS), passaram a ter papel central, pois além de reunirem um volume expressivo de publicações, elas organizam materiais de origens diversas, ou seja, artigos científicos, livros, anais e relatórios técnicos; e os colocam à disposição de pesquisadores. Esses repositórios permitem acessar estudos desenvolvidos em condições ambientais muito distintas, o que é, particularmente, útil para temas relacionados ao microclima, às LCZ e à infraestrutura verde e urbana.

O presente estudo justifica-se pela possibilidade de sintetizar, por meio de ferramentas bibliométricas, o que se tem desenvolvido nesse campo temático. Essa síntese ganha importância quando se considera, por exemplo, a aplicação desses temas em cidades de clima tropical, onde podemos observar com maior intensidade os efeitos térmicos da urbanização. Desta forma, podemos identificar como a literatura tem integrado elementos como morfologia urbana, vegetação e comportamento microclimático, oferecendo suporte para compreender fenômenos complexos que influenciam a vida urbana e a tomada de decisões no planejamento.

O trabalho tem como objetivo geral: analisar padrões, tendências e relações temáticas presentes na produção científica voltada aos temas *Green Infrastructure, Blue Infrastructure, Urban Climate, Local Climate Zones (LCZ)* e *Urban Infrastructure*, considerando publicações indexadas nas bases Scopus e Web of Science entre 2015 a 2026.

Material e Método

Os procedimentos metodológicos do trabalho são classificados como uma pesquisa bibliométrica, descritiva, com abordagem quantitativa e fundamentada na análise de metadados provenientes de bases científicas internacionais.

O acesso às bases Scopus e Web of Science, foi realizado por meio do Portal de Periódicos da CAPES, utilizando-se o login institucional fornecido pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), nas bases foram aplicados mapeamentos das produções científicas, suas tendências e relações, usando como estratégias de pesquisas palavras-chaves na língua inglesa, no Scopus a busca foi em *al fields*, permitindo uma busca mais robusta, com o filtro temporal do período de 2015 a 2026, mesmo com o ano ainda não concluído, a exportação dos artigos foi pela seleção de *all documents on this pag*, estes foram carregados no formato CSV com total de 237 publicações.

Na plataforma da Web of Science, após o login, a pesquisa iniciou com a seleção de *topic* que proporciona acesso a pesquisa por título, resumo e indexação, adicionou as palavras chaves e procedeu com a pesquisa filtrando por artigos, período de publicação de 2015 a 2026 e área de pesquisa, apresentando o resultado de 40 publicações, a exportação foi pela extensão em TXT com seleção de autor, título, fonte e resumo. (MARTINEZ et al., 2024; SOUZA et al., 2024).

O procedimento de seleção e busca de periódicos nas bases de web site, podem ser vistas no quadro 1 abaixo.

Quadro 1- Bases de Pesquisa.

	Item	Descrição
Scopus e Web of Science	Termos de busca	Green Infrastructure (and) Blue Infrastructure (and) Urban Climate (or) Local Climate Zone
	Período	2015 a 2026
	Critérios de Inclusão	Área: Ciências Ambiental; Tipo de Documento: Artigo de Pesquisa; Língua: Inglês e Português; Pais: China, Estados Unidos, Brasil, Reino Unido, Inglaterra; Tipo de Fonte: Revista; Estágio de Publicação: Final; Tipo de Acesso: Aberto
	Critérios de Exclusão	Artigos fora do período de 2015 a 2026; Artigo de Acesso Restrito (pago); Artigos de Revisão, Capitulo de Livro; Áreas fora da Ciências Ambiental; Outros Países; Outras Línguas
	Número de Artigos	Scopus: 236; Web of Science: 40
	Exportação de Dados	Scopus: .CSV; Web of Science: .TXT
	Tipo de Exportação	Scopus: Todos os Documentos – Informação de Citação, Informação Bibliográfica, Resumo e Palavra Chave, Outras Informações; Web of Science: Todos documentos – Registro Completo.

A seleção dos periódicos inicialmente apresentou na Scopus 85.297 periódicos, na Web of Science tiveram 87 periódicos, sendo um dos principais que os principais filtros foram o período, o idioma e o tipo de acesso.

Os registros de metadados provenientes da Scopus e da Web of Science, exportados foram combinados por meio da ferramenta computacional RStudio, utilizando o pacote Bibliometrix, que oferece um conjunto de funções específicas para análise bibliométrica, conforme demonstrado no quadro 2 abaixo. (DA SILVA et al., 2025).

Quadro 2 - Comandos utilizados no RStudio.

	Comando (“ ”)	Resposta
RStudio	library(pacman)	essa ferramenta é útil para a instalar, carregar e atualizar os pacotes
	library(bibliometrix)	disponibiliza as funções necessárias para a conversão, integração e análise dos registros provenientes das bases Scopus e Web of Science
	library(openxlsx)	libera funções para criar, editar e salvar na extensão .xlsx, diretamente no RStudio, sem a necessidade de abrir o Excel®
	convert2df()	transformar os arquivos brutos em “dataframes” padronizados e adequados para a análise bibliométrica
	S(1) <- convert2df(file.choose(), dbsource = "scopus", format = "csv")	permite selecionar manualmente o arquivo no formato CSV(2)
	W(3) <- convert2df(file.choose(), dbsource = "wos", format = "plaintext")	seleciona arquivo e converte o arquivo em formato TXT (plaintext) preservando campos essenciais
	U(4) <- mergeDbSources(S, W, remove.duplicated = TRUE)	combina os registros advindos das duas fontes e aplica um processo de deduplicação automática, que elimina cópias dos dados e minimiza espaço de armazenamento
	write.table (U, "C:/METADAOS/scopus.csv", sep = ";", row.names = FALSE)	dataframe consolidado foi exportado em formato tabular para verificação e armazenamento externo
	P <- U[,c("DI", "PY", "AU", "TI", "SO", "DT", "DE", "TC")]	cria um subconjunto contendo apenas os principais campos de interesse, como: DOI (DI), ano (PY), autores (AU), título (TI), periódico (SO), tipo de documento (DT), palavras-chave (DE) e número de citações (TC)
	write.table (P, "C:/METADADOS/scopus.csv", sep = ";", row.names = FALSE)	exporta o conteúdo de metadados para pasta selecionada
	Res <- biblioAnalysis(U)	gera indicadores bibliométricos essenciais, como produtividade anual, autores mais frequentes, periódicos mais representativos e distribuição de citações
	DS <- summary(object = Res, k = 20)	resume os principais indicadores e organiza os resultados em tabelas

	Comando (“ ”)	Resposta
RStudio	plot(Res, k=20)	permiti visualizar graficamente alguns indicadores
	write.xlsx(U,file="C:/METADADOS/ARTIGOII.xlsx")	exporta os metadados em formato Excel® para pasta de arquivo selecionado
	biblioshiny()	aciona a interface interativa Biblioshiny da plataforma Bibliometrix®

(1)A letra S é apenas referência a base Scopus; (2) Foram realizadas várias tentativas para encontrar o "caminho" C:/METADADOS, sem que o programa respondesse sem apresentar erro, então optou por este comando que permite a seleção diretamente na pasta; (3) A letra W é apenas referência a base Web of Science; (4) A letra U representa o banco unificado de metadados.

Há casos em que os campos das variáveis precisam de ajuste, a própria interface do RStudio permite mapear as colunas e corrigir inconsistências antes de iniciar a análise na interface da web do Biblioshiny, isso ocorreu durante o processamento do trabalho, com unificação de singular/plural, padronização de maiúsculas/minúsculas, exclusão de termos muito genéricos para mapas de coocorrência, entre outros.

O fluxo metodológico desenvolvida no RStudio por meio do Bibliometrix, está embasada numa sequência de análise de metadados que articula coleta, tratamento, modelagem e interpretação de informações científicas, que possibilita a compreensão da dinâmica de produção, identificando padrões estruturais, organizando de forma ordenada conceitos de um determinado campo científico através do conjunto dos periódicos, onde são apresentados variáveis como produção anual, principais autores, periódicos mais produtivos, distribuição por países e instituições, além de métricas de impacto baseadas em citações, resultando em uma abordagem sistemática de investigação científica, capaz de revelar a estrutura e a dinâmica do conhecimento em diferentes áreas, com rigor metodológico e consistente na interpretação dos dados, como podemos verificar na Figura 1 abaixo.



Figura 8 - Fluxo de Analise Bibliométrico.
Fonte: Autores, 2026.

O tratamento e análise de metadados, realizada no sistema RStudio gerou um conjunto com 8 (oito) variáveis: DOI (DI), ano (PY), autores (AU), título (TI), periódico (SO), tipo de documento (DT), palavras-chave (DE) e número de citações (TC); o resultado final no sistema gerou como resultado um conjunto e subconjuntos de 26 variáveis do total de 273 artigos, destacando: tipo de documento, conteúdo de documentos, autores e colaboradores, produção científica anual, artigos mais citados, países dos artigos mais citados, principais fontes, principais palavras chaves, entre outras variáveis necessárias para a análise no web site da Biblioshiny.

No ambiente do Biblioshiny, após carregar os arquivos bibliométricos da pasta de arquivo selecionada, a interface é responsável por reconhecer automaticamente a estrutura do banco de metadados e interpretar as colunas bibliográficas essenciais como: autores, título, periódico, ano de publicação, palavras-chave, números de citações e outros. As análises na interface da web é fundamental para o avanço da pesquisa no campo da ciências ambientais, em específico na análise de microclima em bordas de córregos urbanos, pois mostram o comportamento da produção científica em escala espacial e temporal, oferecendo dados estruturados do desenvolvimento dos temas investigados, organizando de forma estrutural o volume da literatura conectando os saberes necessários para nortear os trabalhos científicos. (OLIVEIRA et al., 2025; DA SILVA et al., 2025).

Os comandos executados no Biblioshiny que possibilitaram as análises bibliométricas, podem ser vistas no quadro 3, abaixo.

Quadro 3 - Comandos utilizados no Biblioshiny.

	Variável	Esperado
Biblioshiny	importar ou carregar – navegar – arquivo	carrega o arquivo final gerado no sistema RStudio na extensão de planilha do Microsoft Excel® (.xlsx)
	visão geral – produção científica anual – média de citação por ano – vida útil dos artigos	sintetiza as principais características da base de dados, apresentando compreensão inicial da estrutura da produção científica, avaliando a dinâmica de crescimento, o campo investigado quanto a expansão e estabilidade da produção ao longo do tempo
	fontes – fontes mais relevantes – fontes mais citadas – impacto das fontes	identifica os periódicos e demais veículos de publicação, quanto a estrutura de publicação, principais canais de comunicação de

		periódicos, distribuição da produção cientifica, grau de concentração das publicações e principal elemento para identificar os periódicos mais relevantes
	autores – autores mais relevantes – autores mais citados – produção dos autores ao longo do tempo – impacto local dos autores	caracterização do número total de autores, da média de autores por publicação e dos padrões de colaboração científica, considerando diferentes níveis de contribuição na produção científica.
	documentos – documentos mais citados globalmente – mais frequentes no mundo – nuvem de palavras – mapa de árvore – tópicos em alta	utilizada para mostrar o conjunto de publicações que compõem a base de dados da pesquisa, identificando o numero total, a distribuição temporal, a tipologia e os principais atributos dos artigos, mostrando a métrica de citações, entre outras variáveis
	estrutura conceitual – rede de concorrência – mapa temático	objetiva a organização temática da literatura cientifica, com a compreensão de como os diferentes tópicos de pesquisa se relacionam, formando grupos temáticos (clusters) que representam a área especifica da pesquisa
	estrutura social – rede de colaboração	verifica os padrões de interação e colaboração entre algumas variáveis envolvidas na pesquisa, como autores, instituições e países, mostrando os principais polos da produção cientifica

Assim que os metadados são validados na plataforma da web site, a interface disponibiliza os painéis de análise, permitindo gerar: gráficos, mapas, redes de coautoria, acoplamento bibliográfico, cocitação e diversas representações visuais, esse fluxo garante que todo o processamento conduzido no RStudio seja aproveitado no ambiente do Biblioshiny, tornando o processo de análise dinâmico, intuitivo e acessível para exploração dos resultados bibliométricos.

Resultados e Discussões

A partir da combinação entre as análises descritivas e relacional realizada no RStudio através do Bibliometrix e posteriormente inseridos no Biblioshiny, foi possível analisar algumas planilhas, gráficos e mapas dos dados obtidos, que serviram tanto para análises quantitativas quanto para a interpretação de padrões relacionais da produção científica estudada.

A bibliometria processada no RStudio com a biblioteca Bibliometrix, gerou 273 dados unificados de publicações que posteriormente foram inseridas no Biblioshiny.

A distribuição temporal das publicações mostrou um crescimento progressivo da produção cientifica no período selecionado (2015 a 2026), entre os anos de 2015 a 2017 não foram encontradas publicações, de 2017 a 2020 a produção anual foi de 32 publicações, que mostra aumento pequeno de produção nos anos iniciais, a partir de 2021 o crescimento se acentuou com 16 publicações, acentuando ano após ano, mostrando que entre 2022 a 2023 foram juntas 61 publicações, no ano de 2024 houve um crescimento expressivo de 53 publicações, atingindo o pico em 2025 com 90 publicações, até o presente momento desta pesquisa o ano de 2026 apresenta 21 publicações, pensando em uma projeção aritmética pode-se imaginar que ao final do ano já existem, aproximadamente, 100 publicações. (MARTINEZ et al., 2024; SOUZA et al.,2024).

De modo geral os valores observados apontam um crescimento acentuado nos últimos anos com tendência de crescimento, projetando o pico temporal próximo ao ano de 2030 onde os trabalhos devem ser acima de 300 publicações anuais.

O impacto cientifico das publicações foi verificado observando a média de citações por artigo (MTA) e a média de produção cientifica anual (MTY), sendo que os mais antigos apresentaram maior média de citações, provavelmente devido ao maior tempo disponível a consultas, em 2017 a MTA foi de 58,45 citações, a partir dessa data é normal apresentar decréscimo quanto as medias, sendo que em 2018 foram 11,37, nos anos seguintes a redução foi gradual, em 2019 foi de 7,22 em 2020 foi de 9,37, de 2021 a 2023 a métrica manteve patamares moderados com 5,71 e 6,64 respectivamente, sugerindo um equilíbrio entre as produções cientificas, nos anos mais recentes observa-se uma queda mais acentuada em 2024 em que foi registrado 4,6, em 2025 2,16 e finalmente em 2026 a menor média registrada com 0,14. Em paralelo observa-se um número crescente de publicações passando de 0 (zero) entre 2015 a 2017 a substanciais 90 em 2025, indicando expansão no campo da pesquisa do assunto abordado, como podemos verificar na figura 2, abaixo.

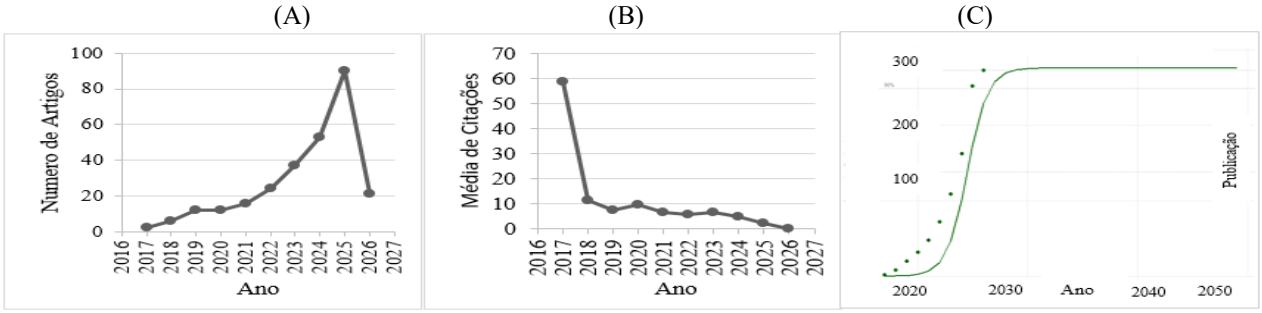


Figura 9 - (A) Média de Citação de Artigo; (B) Média de Produção de Artigo; (C) Estatística de Crescimento de Produção. Fonte: Autores, 2026.

Como principais canais de publicação cientifica a distribuição apresentou 76 fontes, de 273 artigos em um conjunto reduzido de periódicos, com o maior número dado ao *Sustainability* (*Switzerland*), com 42 artigos, que corresponde a 15,38% do total, seguido pelos *Ecological Indicators e Land*, ambos com 31 artigos, equivalente a 11,36% da produção, somados os três periódicos concentram 104 artigos ou 38,10% do total de produção. Após esse primeiro núcleo observa-se que a *Atmosphere* publicou 13 artigos, *Building and Environment* publicou 12, e *Water (Switzerland)* publicou 11, na sequência, *International Journal of Environmental Research and Public Health* e *Sustainable Cities and Society* apresentaram 10 artigos cada. *Journal of Environmental Management e Science of the Total Environment* registraram 8 artigos cada, A partir desse ponto, a produção passou a se dispersar em periódicos com participações reduzidas. Quanto a métrica de impacto, considerando o h-index (quantidade de produção científica e impacto das publicações), g-index (artigos altamente citados, sensível a picos de impacto científico), m-index (razão entre o h-index e o tempo de carreira científica), total de citações (TC), número de publicações (NP) e ano inicial de publicação (PY start), verificou que a *Ecological Indicators* apresentou o maior h-index local, com valor 12, além de g-index 21, m-index 2,40, 466 citações totais e 31 publicações iniciadas em 2022, no entanto a *Sustainability (Switzerland)* liderou em número de artigos (42) e acumulado 627 citações totais, seu h-index local foi 11 e o m-index, 1,10, já a *Science of the Total Environment*, com apenas 8 publicações, o periódico acumulou 1.730 citações totais, o maior valor entre todas as fontes listadas, seu h-index local foi 7, o g-index foi 8 e o m-index foi 0,70, essas características indicam não apenas alta produtividade, mas também forte consistência de citação, sugerindo que os artigos publicados nesses periódicos exerceram papel estruturante no corpus estudado, como podemos ver na figura 3, abaixo.

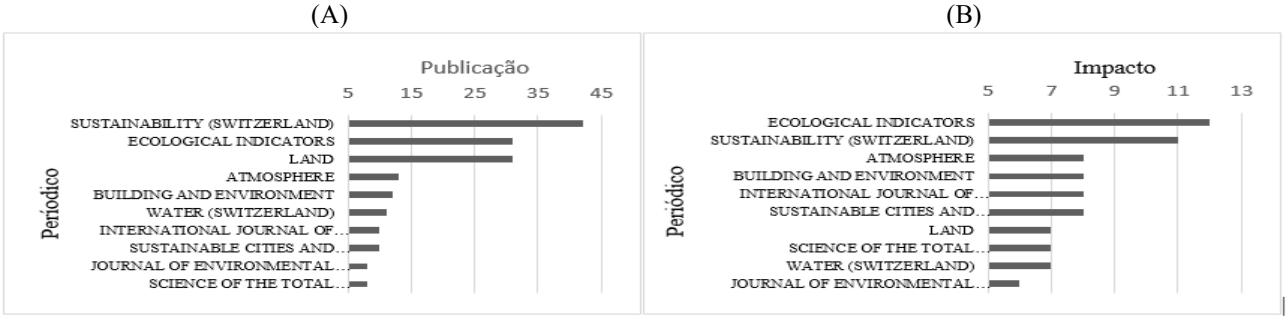


Figura 10 - (A) Periódicos Mais relevantes; (B) Periódico Mais Citado
Fonte: Autores, 2026.

A pesquisa identificou 1.155 autores, revelando uma concentração de produtividade em um grupo reduzido de pesquisadores, uma expansão recente da produção e diferenças nítidas entre volume de publicação e influência bibliométrica local, com destaque para Li X com 14 artigos, seguido por Wang Y (12 artigos) e Wang J (11 artigos), outros destaques para Liu Y com 9 artigos, Li J, Wang M e Zhang X, todos com 8 artigos, outro grupo de pesquisadores aparecem com 7 artigos cada, como Chen X, Chen Y e Li Y. Observando os 273 artigos, Li X participou com 5,13%, do corpus editorial, Wang Y com 4,4% e Wang J com 4,03% um grupo ativo e recorrente, podendo considerar consolidado na produção científica. O autor de maior impacto local é o Wang Y com h-index 8, g-index 12, m-index 1,333, com 268 citações totais em 12 publicações, iniciadas no ano de 2021 que indica alta velocidade de consolidação bibliometrica. LIU Y, aparece na sequência com h-index 7, g-index 9, m-index 0,875, com 278 citações totais e 9 publicações, iniciando em 2019, outro destaque é o Li X, primeiro lugar em produtividade, apresentou h-index 6, g-index 13, m-index 1,00, com 170 citações totais em 14 publicações, iniciadas em 2021, os demais autores como Wang J, terceiro em número de artigos, registrou h-index 5, g-index 10, m-index 0,625, 112 citações totais e 11 publicações, com início em 2019 e outros com números de indexação ≥ 5, a comparação entre as variáveis mostrou que a produtividade e o impacto local estiveram relacionados, mas não de forma linear, em alguns casos houve convergência que combinou alta produção, alto h-index e elevado total de citações, no entanto em outros, observou-se uma dissociação clara podendo afirmar que o destaque é para expansão recente e o adensamento autoral, notado principalmente a partir do ano de 2023, esses dados podem ser visto na figura 4, abaixo.

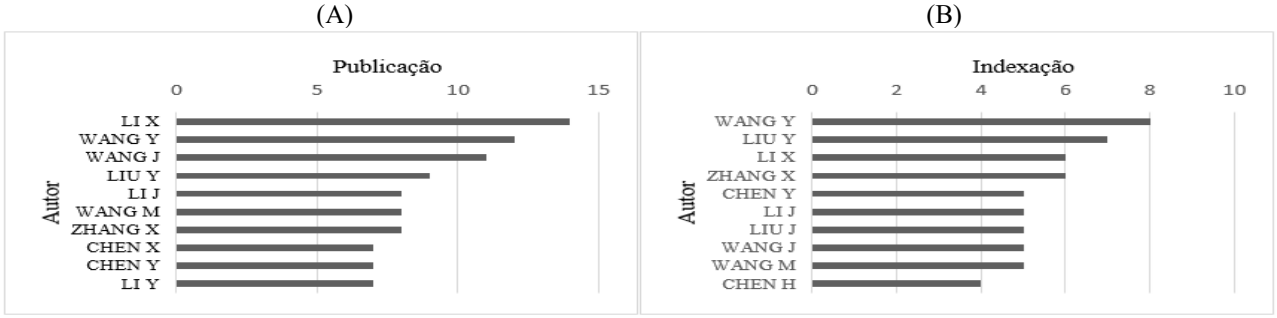


Figura 11 - (A) Numero de Artigos Publicados; (B) Índice de Indexação.
Fonte: Autores, 2026.

A correspondência entre os autores e os países, a partir da distribuição de publicação de artigos evidencia a China como destaque com 155 artigos de autoria correspondente, que equivale a 56,78% das publicações, em segundo vem o Estados Unidos da América com 31 artigos (11,36%) e na terceira posição o Reino Unido com 19 artigos e 6,96% do total, acrescentando o Brasil e Hong Kong, com 7 e 5 respectivamente os cinco primeiros somam 217 artigos com 80,97% do total. Quanto a citações a China ocupou a primeira posição com 2.626, seguida pelo Reino Unido, com 1.510, e pelos Estados Unidos, com 1.067. No campo de documentos mais citados o destaque foi para Guanawardena K, 2017, *Sci Total Environ*, com 1.138 citações totais, 113,8 citações por ano e 1,946963 de citação normalizada, este artigo respondeu por 33,99% das citações acumuladas entre os 20 documentos mais citados, na sequência apareceu o artigo Markolf S, 2018, *Earth's Future*, com 231 citações, e Dong J, 2020, *Landscape and Urban Planning*, com 202. Em quarto lugar veio Yu S, 2020, *Sci Total Environ*, com 191, seguido por Berndtsson R, 2019, *Journal of Enveronmental Management*, com 155, e Sutton Grier A, 2018, *Sustainability* com 133, verificando que os 10 documentos mais citados acumularam 2.529 citações, enquanto os 20 primeiros somaram 3.348, dessa forma pode verificar uma estrutura seletiva de consagração bibliométrica, onde poucos trabalhos responderam por parcela substancial de influência global, como visto na figura 5, abaixo.

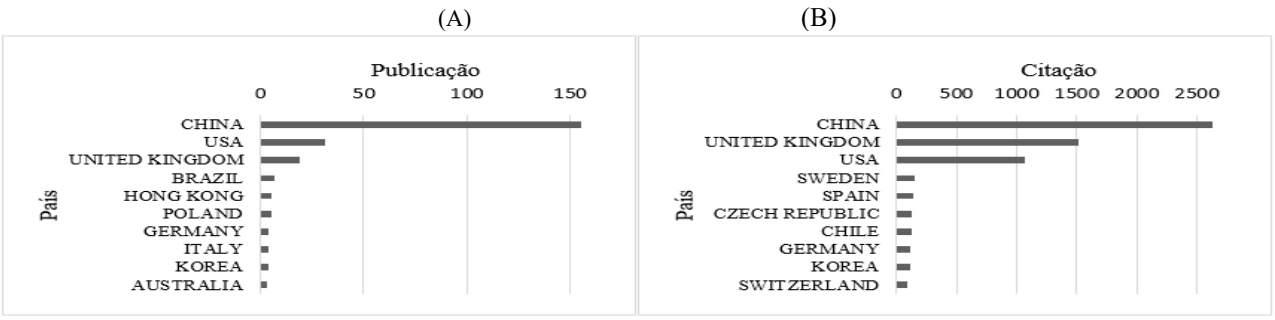


Figura 12 - (A) Numero de Produção; (B) Número de Citação
Fonte: Autores, 2026.

A produção dos artigos ficou concentrada na China com expressivos 184 artigos, que corresponde a 52,13%, seguida pelo Estados Unidos da América com 36 artigos (10,20%) e pelo Reino Unido com 29 publicações (8,22%), sendo que os três somados representam 70,56% com 249 artigos, seguidos por países como República Tcheca (11), o Brasil (9), a França (8) e a Noruega (7), Itália e Suíça apresentaram 6 registros cada, enquanto Alemanha, Países Baixos, Polônia, Coreia do Sul e Espanha registraram 5 cada., Os dez países mais produtivos concentraram 301 registros, equivalentes a 85,27% do total, o que mostra um sistema científico de difusão geográfica ampla.

Podendo assim observar uma tensão central, onde há forte concentração geográfica da produção e uma distribuição mais heterogênea do impacto científico. A China dominou a produção em termos absolutos, tanto na contagem geral de países quanto na autoria correspondente, mas não liderou em rendimento médio de citações. O Reino Unido, com produção muito menor, apresentou média citacional muito superior. Países como Suécia, Chile e Espanha, tiveram participação altamente qualificada em termos de repercussão.

Essa dissociação indicou que o crescimento quantitativo não implica automaticamente na centralidade qualitativa equivalente, que em termos científicos, sugere a coexistência de dois movimentos, o primeiro foi o da massificação produtiva, liderado sobretudo pela China e o segundo foi o da consagração seletiva, em que um grupo menor de países e documentos concentrou a visibilidade internacional mais intensa.

Como benefício pode-se destacar a compreensão da dinâmica estrutural do campo investigado, sendo que essa abordagem permiti superar interpretações simplificadas baseadas exclusivamente no volume de publicações, incorporando uma perspectiva que integra dimensões quantitativas e qualitativas da produção científica, como representado na figura 6 abaixo.



Figura 13 - Distribuição de Publicação
Fonte: Autores, 2026.

Quando analisados as citações mais relevante, observa-se que dos 273 artigos vistos, estes acumulam 6.669 citações globais, com média de 24,43 e mediana de apenas 9 citações por documentos, essa diferença se deve pelo fato da distribuição ser assimétrica , ou seja a presença de poucos trabalhos muito citados e grande número de com impacto mais modesto, como observado nos principais documentos, onde o primeiro deles apresenta 17,06% de todas as citações, os três primeiros acumulam 23,56%, os cinco primeiros 28,74% e os dez primeiros 37,49%, podendo ser afirmado que a estrutura da literatura encontrada no corpus bibliográfico não se distribui globalmente de forma homogenia. O Artigo mais citado o Guanawardena K., 2017, *Science of the Total Environment*, obteve 1.138 citações globais, 113,8 citações por ano e 1,946963 de citação normalizada, seguido por Markolf S., 2018, *Earth's Future*, com 231 citações, 25,67 citações por ano e 2,257329 de citação normalizada, depois o Dong J., 2020, *Landscape and Urban Planning*, com 202 citações, 28,86 citações por ano e 3,080051 de citação normalizada, e Yu S., 2020, *Science of the Total Environment*, com 191 citações, 27,29 citações por ano e 2,912325 de citação normalizada, e em quinto lugar Berndtsson R., 2019, *Journal of Environmental Management*, com 155 citações, 19,38 citações por ano e 2,683983 de citação normalizada, esses cinco documentos somaram 1.917 citações de toda a massa citacional, do ponto de vista da repercussão anual, os resultados indicaram que nem sempre os documentos mais citados em termos absolutos foram os mais dinâmicos na fase recente da literatura, observados na tabela 1 abaixo.

Tabela 5 - Citações mais Relevantes.

Artigos	DOI	CG	CY	CN
Guanawardena K., 2017, Sci Total Environment	10.1016/j.scitotenv.2017.01.158	1138	113,8	1,94
Markolf S., 2018, Earth's Future	10.1029/2018EF000926	231	25,66	2,25
Dong J., 2020, Landscape and Urban Planning	10.1016/j.landurbplan.2020.103907	202	28,85	3,08
Yu S., 2020, Sci Total Environment	10.1016/j.scitotenv.2020.138229	191	27,28	2,91
Berndtsson R., 2019, J of Environmental Management	10.1016/j.jenvman.2019.03.094	155	19,37	2,68
Sutton-Grier A., 2018, Sustainability	10.3390/su10020523	133	14,77	1,29
Zhou W., 2023, Sci Total Environment	10.1016/j.scitotenv.2022.160712	126	31,5	4,85
Dobbs C., 2019, Urban Ecosystems	10.1007/s11252-018-0805-3	122	15,25	2,11
Chiabai A., 2018, Sci Total Environment	10.1016/j.scitotenv.2018.03.323	121	13,44	1,18
Wang K., 2021, Sustainability	10.3390/su131910983	110	18,33	2,76

CG – Citação Global; CY – Citação por Ano; CN – Citação Normalizada.

A distribuição por periódicos entre os artigos mais citados também foi expressiva, com o *Science of the Total Environment* aparecendo com maior recorrência entre os vinte primeiros, somando quatro entradas diretas, além de uma variação de indexação que também se referiu ao mesmo periódico, o *Sustainability* apareceu três vezes, enquanto *Journal of Environmental Management*, *Earth's Future* e *Sustainable Cities and Society* apareceram duas vezes cada, evidenciando a consagração global dos documentos, não se dispersando aleatoriamente pelo sistema editorial, mas se concentrando em um núcleo de periódicos capazes de combinar visibilidade internacional, aderência temática e forte poder de difusão.

A estrutura de rede de palavras-chave, permitiu identificar a estrutura e as principais frentes de pesquisa do campo estudado, destacando o núcleo temático em torno dos termos China, espaços verdes urbanos, áreas urbanas, planejamento urbano, resfriamento microclimático e ilhas de calor, vindo em segundo plano os termos infraestrutura verde, mudanças climáticas, gestão de água e urbanização e mais ainda a presença dos termos analise espaço-temporal, uso da terra, serviços ecossistêmicos e desenvolvimento sustentável, sendo estes os principais temas, no entanto observou que no total foram citados 50 termos mais recorrentes no corpus da pesquisa. No entanto destaca-se que os três primeiros termos totalizam 345 ocorrências e os dez primeiros 664, que significa que a estrutura do corpus está concentrada em poucos termos de alta recorrência na literatura pesquisada.

A arquitetura da rede neural das palavras foi distribuída em Cluster1 (um) com 22 nós, Cluster 2 com 23 nós e o Cluster 3 com apenas 5 nós, mostrando que os dois primeiros estão fortemente relacionados e o terceiro com menor intensidade, desta forma verificou que a capacidade de intermediar conexões entre as partes da rede, aparece a china (97,77), *urban area* (89,05) e greenspace (76,69), seguido de *urban planning* (48,99), *green infrastructure* (19,73) e *climate change* (16,71), como sendo a rede principal. Quanto ao prestigio relacional da rede de palavras apresentou a china (0,072), *greenspace* (0,06), *urban area* (0,06), seguidos por *urban planning* (0,04), *cooling* (0,03) e *heat island* (0,03) como sendo os termos que ocuparam posições decisivas na circulação conceitual do campo de pesquisa.

Um aspecto relevante é a coexistência entre um léxico técnico como *remote sensing*, *surface temperature*, Envi-Met, *machine learning*, GIS e NDVI, e ainda um léxico normativo e estratégico *sustainability*, *nature-based solutions*, *decision making*, *risk assessment* e *urban planning,* denotando uma convivência no mesmo campo não apenas de produção de diagnóstico, mas passando a operar também como campo de suporte à formulação de políticas e estratégias urbanas, estas observações podem ser vistas na figura 7, abaixo.

(A) (B)



Figura 14 – (A) Rede de Palavras; (B) Rede Neural de Palavras.
Fonte: Autores, 2026.

A produção brasileira foi restrita e modesta comparando com países como a China, Estados Unidos da América e Europa, destacando apenas 9 ocorrências, 71 citações totais, com média aproximada de 10,1 citações por artigo, esse valor está abaixo da média global da base (24,43 citações por documento) e inferior ao desempenho de países como o Reino Unido (79,5 citações médias por artigo), a Suécia (78,0) e a Espanha (67,5). Importante ressaltar que o Brasil não está no centro das inter-relações de redes colaborativas, devido ao baixo volume de produção cientifica, reduzido impacto citacional e baixa internacionalização, fica posicionado na periferia com relação ao tema pesquisado.

Considerações Finais

O trabalho cumpriu com objetivo ao identificar padrões, tendências e relações temáticas da produção científica global (2015-2026), revelando um crescimento expressivo com pico em 2025 e projeção ascendente para 2030. Os pilares centrais identificados, Green Infrastructure e Local Climate Zones (LCZ), consolidaram-se como fundamentais para mitigar ilhas de calor e orientar o planejamento urbano resiliente. Os resultados demonstraram forte concentração geográfica da produção, com destaque para a China, associada à expansão quantitativa, enquanto o impacto científico revelou distribuição mais seletiva entre países e documentos, ainda destaque para o Reino Unido pelo elevado impacto qualitativo das citações. Através do Biblioshiny, demonstrou-se que o campo evoluiu de diagnósticos técnicos (GIS, NDVI) para o suporte estratégico em políticas de sustentabilidade urbana. Conclui-se que o campo apresenta maturação acelerada, com avanços metodológicos e potencial de expansão, especialmente em contextos tropicais. Contudo, o Brasil mantém-se em posição periférica, demandando maior internacionalização.

Referências Bibliográficas

DA SILVA, J. R.; DOS SANTOS, A. M.; GOMES, R. A. Unidades de Conservação em áreas urbanas: uma revisão de literatura. Ateliê Geográfico, Goiânia, v. 19, n. 3, p. 238–264, 2025. DOI: 10.5216/ag.v19i3.82238. Disponível em: https://revistas.ufg.br/atelie/article/view/82238. Acesso em: 05 mar. 2026.

MARTINEZ, J. & C. V.; PERALTA C. M.; ANORMALIZA R. R.; ARAIS O. F.; PAREDES D. V. Geographic Information Systems (GISs) Based on WebGIS Architecture: Bibliometric Analysis of the Current Status and Research Trends. Sustainability. V. 16, n. 6439, 2024. DOI: 10.3390/su16156439. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/382674275_Geographic_Information_Systems_GISs_Based_on_WebGIS_Architecture_Bibliometric_Analysis_of_the_Current_Status_and_Research_Trends. Acesso em: 05 mar. 2026.

OLIVEIRA, M. F.; CASTRO, C. F. S.; COUTO, B. O. C.; OLIVEIRA, R. M. S. F. Global solid waste management and climate-relevant innovations: A scientometric assessment (2014–2024). Sustainable Chemistry for Climate Action, V. 8, dez 2025. DOI: 10.1016/j.scca.2025.100181. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/ science/article/pii/S2772826925001269. Acesso em: 04 mar.2026.

SOUZA, A. P., MELO R.R., CASTAGNA D., STANGERLIN D. Nativa: consolidação e contribuições para a divulgação científica (2013-2023). Nativa. V. 12, n. 01, p. 01-10, 2024. DOI: 10.31413/nat.v12i1.17169. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/378727522_Nativa_consolidacao_e_contribuicoes_para_a_divulgacao_cientifica_2013-2023. Acesso em: 14 nov. 2025.

CONECTIVIDADE DA PAISAGEM: PROPOSIÇÃO DE CORREDORES ECOLÓGICOS ENTRE O PARQUE NACIONAL DE BRASÍLIA E A ESTAÇÃO ECOLÓGICA DE ÁGUAS EMENDADAS

1 Joelson Carlos Macêdo da Cruz, 2 Carlos Augusto Maruch Tonelli, 3 Wellington Vieira Mesquita, 4 Kátia Adriana de Souza, 5 Márcio Celestino Mendes, 6 Maria Cristina de Oliveira

1 Universidade de Brasília, ProfÁgua, jcciencias1@gmail.com; 2 Universidade de Brasília, PPGCA, catonelli86@gmail.com; 3 Universidade de Brasília, PPGCA, wellington.unb.ga@gmail.com; 4 Universidade de Brasília, PPGCA, katia.sousa@aluno.unb.com.br; 5 Universidade de Brasília, PPG-Mader, marciomendes3331@gmail.com; 6 Universidade de Brasília, Faculdade UnB Planaltina, Docente ProfÁgua, mcrisoliveira@unb.br

Palavras-chave: Bioma Cerrado, Conectividade ecológica; Infraestrutura verde.

Resumo

Este estudo analisa a dinâmica do uso e cobertura do solo no Distrito Federal, com ênfase na conectividade ecológica entre o Parque Nacional de Brasília e a Estação Ecológica de Águas Emendadas, diante do avanço da fragmentação da paisagem no bioma Cerrado. A metodologia baseou-se na integração de dados do MapBiomas com técnicas de geoprocessamento e modelagem de caminhos de menor custo, visando identificar áreas prioritárias para conectividade e propor corredores ecológicos. Os resultados evidenciaram uma redução significativa da vegetação nativa entre 1985 e 2024, com perda de aproximadamente 19,5%, associada à expansão agrícola e urbana, que apresentou crescimento superior a 200% no período analisado. A modelagem permitiu identificar três rotas potenciais de conectividade, destacando-se o corredor A como a alternativa mais viável, devido à maior continuidade de vegetação nativa e menor interferência antrópica. Conclui-se que a implementação de corredores ecológicos, no contexto da infraestrutura verde, constitui uma estratégia fundamental para a mitigação dos efeitos da fragmentação, contribuindo para a conservação da biodiversidade e para o planejamento ambiental sustentável.

Introdução

As transformações no uso e cobertura do solo têm se intensificado nas últimas décadas, especialmente em regiões de elevada pressão antrópica, resultando em profundas alterações na estrutura e no funcionamento dos ecossistemas naturais. No bioma Cerrado, esse processo é particularmente crítico, uma vez que a expansão urbana e agrícola substitui a vegetação nativa por áreas antrópicas, promovendo a fragmentação da paisagem e comprometendo processos ecológicos essenciais, como o fluxo gênico, a dispersão de espécies e a resiliência dos ecossistemas (FAHRIG, 2019; HADDAD et al., 2015).

No contexto do Distrito Federal, essas transformações são evidentes nas áreas que circundam o Parque Nacional de Brasília (PNB) e a Estação Ecológica de Águas Emendadas (ESEC-AE). Apesar de serem núcleos vitais para a conservação, estas Unidade de Conservação encontram-se progressivamente isoladas por uma matriz de infraestrutura viária, expansão urbana e atividades agropecuárias. Tal isolamento é agravado pelo fato de que a fragmentação não reduz apenas a área do habitat, mas altera a configuração espacial dos remanescentes, aumentando o efeito de borda e a resistência da matriz ao deslocamento da fauna, conforme as premissias de Turner, Gardner e O'Neill (2015).

Embora a importância ecológica dessas áreas seja reconhecida, observa-se uma lacuna técnica quanto à identificação de rotas específicas e modeladas que possam restabelecer a conexão física entre elas em um cenário de urbanização crescente. Diante desse cenário, questiona-se: quais seriam as rotas de menor custo e maior viabilidade ecológica para promover a conectividade funcional entre o PNB e a ESEC-AE no atual mosaico territorial do Distrito Federal?

Como estratégias para mitigar esses efeitos, a proposição de corredores ecológicos surge como uma solução eficaz para favorecer o deslocamento biológico. Essa abordagem insere-se no conceito de infraestrutura verde, que busca integrar elementos naturais ao planejamento territorial para aumentar a resiliência das paisagens frente às pressões ambientais. Esses corredores atuam como elementos estruturantes da paisagem, permitindo a troca genética entre populações e contribuindo para a manutenção dos processos ecológicos (CUSHMAN; McGARIGAL, 2020).

Paralelamente, o conceito de infraestrutura verde emerge como uma abordagem complementar e integradora, fundamentada na ecologia urbana, configurando-se como uma alternativa para promover o crescimento sustentável das cidades. Essa abordagem busca conservar e potencializar os serviços ecossistêmicos e seus benefícios à população, por meio da incorporação de elementos naturais ao planejamento territorial, com vistas ao aumento da resiliência das paisagens frente às pressões ambientais (Martins, 2021). Nesse contexto, a conectividade ecológica constitui um dos pilares da infraestrutura verde, sendo essencial para a construção de territórios sustentáveis e adaptados às mudanças ambientais (DISTRITO FEDERAL, 2019).

Dessa forma, o presente estudo objetiva analisar a conectividade da paisagem no Distrito Federal e propor corredores ecológicos entre o Parque Nacional de Brasília (PNB) e a Estação Ecológica de Águas Emendadas (ESEC-AE). Para isso, foram utilizadas técnicas de geoprocessamento e modelagem espacial de caminho de menor custo (CMC), visando identificar áreas prioritárias para a conectividade e subsidiar o planejamento ambiental integrado e sustentavel para a região.

Material e Métodos

As etapas metodológicas adotadas neste estudo fundamentaram-se na integração de ferramentas de geoprocessamento, análise multitemporal e modelagem de conectividade. O fluxo de trabalho foi segmentado em fases que compreendem desde a delimitação da área de estudo e o diagnóstico do uso e cobertura da terra, até a análise de declividade, a caracterização da composição socioambiental e a proposição técnica de corredores ecológicos.

A delimitação da área de estudo é de 164.774 ha, que abrange a região entre o PNB e a ESEC-AE. Áreas de relevância ecológica e a distância aproximada de 20 km (em linha reta) entre as duas Unidades de Conservação (Figura 01). Foram consideradas também informações de uso e ocupação do solo, de declividade e a presença de Áreas de Preservação Permanente, fundamentais para compreender restrições físicas e potenciais rotas de conectividade entre as duas áreas.

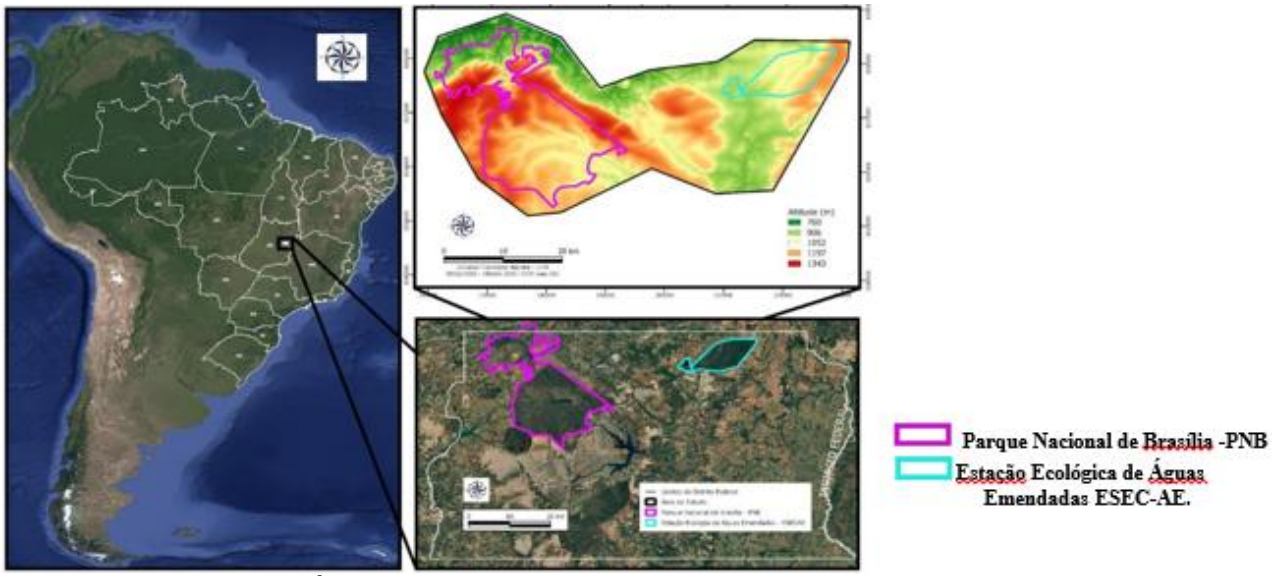


Figura 01: Área de estudo no Distrito Federal, destacando o PNB e a ESEC-AE.
Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Em seguida, procedeu-se à análise das alterações no uso e ocupação do solo entre os anos de 1985 e 2024 (Figura 02). Para isso, foram utilizados os arquivos raster classificados da Coleção MapBiomas, correspondentes aos anos selecionados. Esses arquivos foram posteriormente vetorizados, permitindo o cálculo da área ocupada por cada classe temática, incluindo vegetação nativa (formações florestais, savânicas e campestres), pastagem, áreas urbanas, silvicultura, mosaicos de usos, agricultura (com destaque para soja) e corpos d'água.

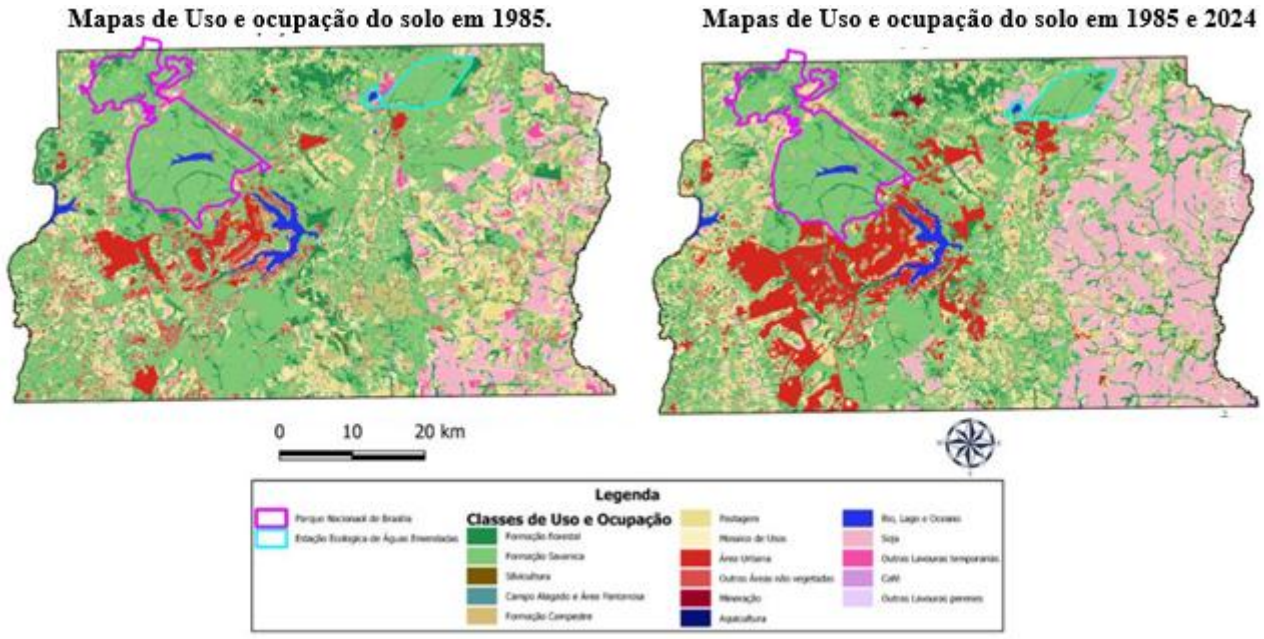


Figura 02: Mapas de Uso e ocupação do solo em 1985 e 2024 no Distrito Federal.
Fonte: MAPBIOMAS (2023).

Esses dados foram integrados ao mapa de declividade (Figura 03), possibilitando analisar como características topográficas influenciaram a ocupação e a fragmentação da paisagem.

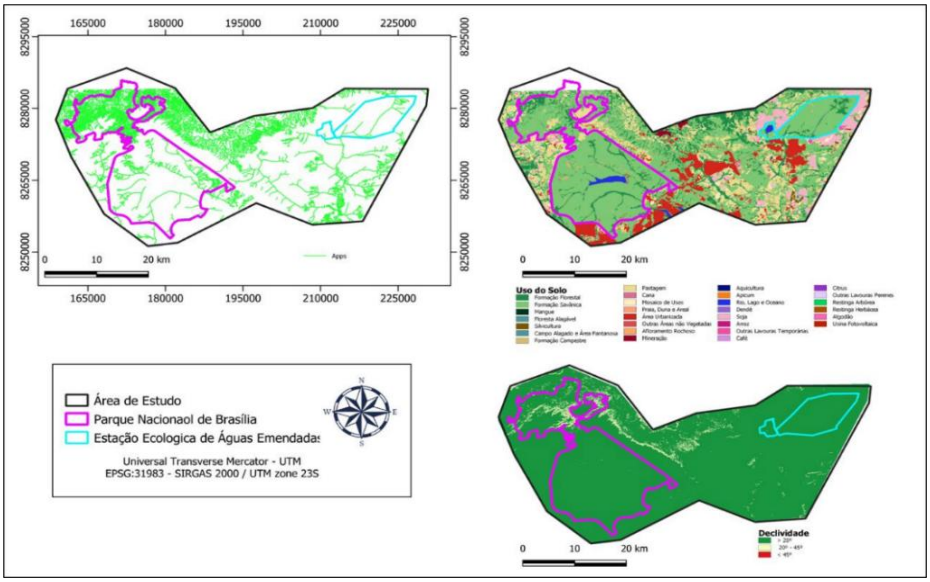


Figura 03: Uso do solo e declividade na área de estudo no Distrito Federal
Fonte: MAPBIOMAS (2023).

Assim, foram comparados os mapas de uso e cobertura do solo dos anos de 1985 e 2024 (Figura 02) e o mapa da APPs, uso do solo e declividade (Figura 03). O uso e cobertura do solo foi considerado como variável principal, sendo utilizadas classes temáticas para representar diferentes níveis de resistência da paisagem. A declividade foi incorporada como variável complementar, sendo derivada a partir do modelo digital de elevação e integrada à análise de forma ponderada.

A superfície final de resistência foi obtida por álgebra de mapas, integrando o uso do solo (variável principal) e a declividade (variável moderadora). Na reclassificação, as classes de vegetação nativa e APPs receberam menores valores de resistência por sua adequação ao fluxo biológico, enquanto áreas agrícolas e urbanas receberam pesos elevados devido à maior perturbação antrópica. A declividade foi ponderada considerando que áreas mais inclinadas apresentam menor propensão à ocupação, favorecendo a permeabilidade da paisagem.

A composição socioambiental (Figura 04) foi gerada pela integração das bases espaciais, delimitando-se a área entre o PNB e a ESEC-AE. Os dados processados incluíram as séries temporais de uso e cobertura do solo do MapBiomas (1985 e 2024), o Modelo Digital de Elevação (MDE/SRTM) para o mapa de declividade e a hidrografia digital para a delimitação das APPs.

A modelagem seguiu a proposição de Adriaensen *et al*. (2003), ponderando a distância euclidiana pela impedância da matriz. Utilizou-se resolução de 30 metros para preservar elementos lineares e aplicou-se a correção de fator √2 para deslocamentos diagonais. A robustez das rotas foi assegurada por análise de sensibilidade, validando a estabilidade da proposta frente à atribuição de pesos. E assim, possibilitou caminhos de conectividade, e a proposição de três corredores ecológicos potenciais.

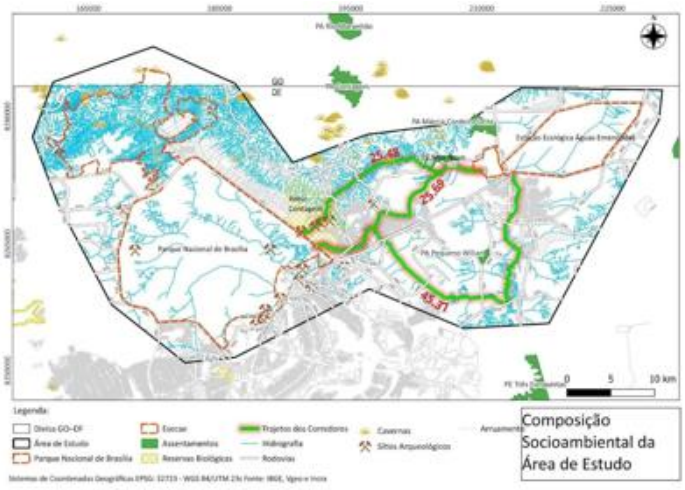


Figura 04: Composição Socioambiental da área de estudo.
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Sendo assim, aplicaram-se os critérios para identificar as rotas potenciais de conectividade ecológica entre o PNB e a ESEC-AE, considerando o uso e ocupação do solo, com ênfase em vegetação nativa e barreiras, a declividade do terreno para viabilidade física e as APPs como eixos naturais preferenciais. Esses critérios foram cruzados gerando três corredores ecológicos potenciais, denominados A, B e C, cada qual representando uma rota distinta de conexão. Essa fase permitiu avaliar visual e quantitativamente a configuração espacial das rotas, fornecendo subsídios para a seleção posterior da alternativa mais viável.

Por fim, a abordagem metodológica adotada permitiu integrar modelagem espacial e análise territorial, proporcionando uma avaliação sistêmica da conectividade da paisagem e subsidiando a proposição de estratégias de infraestrutura verde aplicáveis ao contexto do bioma Cerrado no Distrito Federal.

Resultados e Discussão

A análise espacial realizada neste estudo evidenciou que a Estação Ecológica de Águas Emendadas (ESEC-AE) e o Parque Nacional de Brasília (PNB) encontram-se separados por aproximadamente 20 km em linha reta, configurando uma distância significativa para a movimentação da fauna e para a manutenção da conectividade ecológica entre esses dois importantes núcleos de conservação.

A partir do cruzamento entre uso e cobertura do solo e declividade, foram identificadas áreas com maior suscetibilidade à degradação e menor potencial de regeneração, associadas à presença de fragmentos pequenos e isolados, proximidade de vias e áreas urbanizadas, bem como a condições topográficas específicas. Esses fatores contribuem para o aumento da resistência da paisagem ao deslocamento da fauna, reforçando o papel da urbanização como elemento limitante à conectividade ecológica. Esses conjuntos de dados possibilitaram uma análise multitemporal do uso e cobertura do solo entre 1985 e 2024, conforme detalhado na Tabela 1, onde revelou uma profunda transformação na paisagem do Distrito Federal, marcada pela substituição progressiva da vegetação nativa do bioma Cerrado por áreas agrícolas e urbanas. A pequena variação na área total decorre de arredondamentos ou ajustes inerentes ao processamento cartográfico e à classificação das imagens.

Tabela 1. Variações do tipo de uso e cobertura do solo no Distrito Federal.
Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Tipo de Uso e Cobertura do Solo	Área 1985 (ha)	Área em 2024 (ha)	Diferença de área entre 1985 e 2024 (ha)
Formação Florestal	63.677,51	62.079,93	-1.597,58
Formação Savânica	263.141,83	200.977,84	-62.163,99
Silvicultura	284,71	2.171,75	1.887,04
Campo Alagado e Área Pantanosa	2.862,61	1653,5	-1.209,11
Formação Campestre	29.044,18	11632,92	-17.411,26
Pastagem	6.6871,74	75.212,54	8.340,8
Mosaico de Usos	53.349,48	41.455,49	-11.893,99
Área Urbana	21.070,55	62.687,87	41.617,32
Outras Áreas não vegetadas	25.169,62	4.680,63	-20.488,99
Mineração	140,45	707,50	567,05
Aquicultura	0	11,27	11,27
Rio, Lago	6.958,82	6.462,81	-496,01
Soja	33.336,37	103.759,64	70.396,07
Outras lavouras temporárias	10.145,73	2.618,75	-7.526,98
Café	110,22	224,6	114,38
Outras lavouras perenes	126,06	8,79	-117,27
Área total do DF (ha)	**576.345,83**		

Além disso, as formações savânica e florestal, principais representantes da vegetação nativa, passaram de aproximadamente 326,8 mil hectares em 1985 (56,71% da área total) para 263,1 mil hectares em 2024 (45,64%), representando uma redução de cerca de 19,5%. Em contrapartida, a área destinada à agricultura, com destaque para a cultura da soja, apresentou crescimento superior a 200%, passando de 33,3 mil hectares para 103,7 mil hectares no período analisado. De forma semelhante, a área urbana expandiu-se significativamente, passando de aproximadamente 21 mil hectares para 62,6 mil hectares, o que corresponde a um aumento de cerca de 198%.

Essas transformações indicam que a expansão agrícola e urbana constitui o principal vetor de conversão de áreas naturais, contribuindo para a simplificação da matriz da paisagem e para o isolamento dos fragmentos remanescentes. Conforme os padrões de fragmentação descritos por Turner, Gardner e O'Neill (2015), essa configuração intensifica o efeito de borda, reduz a conectividade ecológica e compromete a capacidade dos fragmentos em sustentar populações viáveis a longo prazo.

A análise integrada com a declividade indica que a expansão agrícola e urbana ocorreu predominantemente em áreas de menor inclinação, favorecendo a mecanização e a ocupação intensiva do território, o que reforça a pressão sobre áreas ambientalmente estratégicas.

Por conseguinte, as modelagens e as análises de conectividade entre o PNB e a ESEC-AE, foram propostos três corredores ecológicos, denominados A, B e C, conforme a Figura 05.

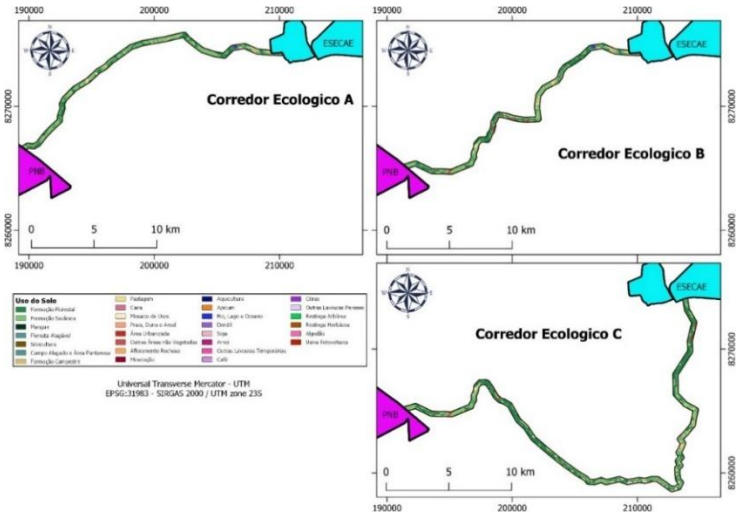


Figura 05: Corredores ecológicos.
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Da mesma forma, a análise comparativa das diferentes alternativas dos corredores ecológicos, consideram além da área total e a menor distância entre fragmentos, mas também os parâmetros que influenciam a composição da paisagem, a heterogeneidade estrutural e a qualidade dos seus elementos (Tabela 2).

Tabela 2: Dados de Uso e ocupação do solo em cada proposta de corredor ecológico
Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Tipo de Cobertura do Solo	Corredor A (ha)	Corredor B (ha)	Corredor C (ha)
Formação florestal	307,78	329,18	769,94
Formação Savânica	603,05	474,57	676,69
Silvicultura	0	0	2,24
Campo Alagado e Área Pantanosa	0	1,29	1,29
Formação Campestre	1,9	0	3,36
Pastagem	64,7	106,34	172,3
Mosaico de Usos	13,42	22,4	97,46
Área Urbana	0	66,62	76,42
Outras Áreas não vegetadas	0	1,99	0,95
Mineração	0	0	0
Aquicultura	0	0	0
Rio, Lago e Oceano	6,03	1,69	0,43
Soja	5,07	5,07	7,83
Outras Lavouras temporárias	0	0	0
Café	0	0	0
Outras Lavouras perenes	0	0	0
Área Total (ha)	**1004,88**	**1006,49**	**1800,04**

Nesse contexto, observa-se que a ESEC-AE e o PNB encontram-se atualmente inseridos em uma matriz altamente antropizada, composta por áreas urbanas, rodovias e atividades agropecuárias, o que dificulta o fluxo gênico e o deslocamento de espécies entre as unidades de conservação. Conforme os padrões de fragmentação descritos por Turner, Gardner e O'Neill (2015), essa configuração aumenta o efeito de borda, diminui a conectividade ecológica e reduz a capacidade dos remanescentes suportarem populações viáveis a longo prazo. Consequentemente, evidencia que cada rota exerce influência distinta sobre a conectividade, o que torna essencial avaliar múltiplos critérios para uma proposta mais eficiente.

Esses resultados corroboram as conclusões de Fahrig (2019), que destaca que a fragmentação compromete não apenas a extensão dos habitats, mas também processos ecológicos essenciais, como dispersão e colonização. De forma complementar, Haddad et al. (2015) ressaltam que os efeitos da fragmentação tendem a acumular-se ao longo do tempo, podendo resultar em colapsos ecológicos persistentes.

Classe	Corredor A	Corredor B	Corredor C
Vegetação Nativa	Alta	Média	Média
Áreas Antrópicas	Baixa	Alta	Média
Área urbana	Ausente	Presente	Presente
Extensão (ha)	1004,88	1006,49	1800,04

Tabela 3: Dados de uso e ocupação do solo em cada proposta de corredor ecológico
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Assim, foram geradas superfícies de resistência a partir das camadas de Uso e ocupação do solo e declividade, que foram ponderadas na matriz de importância. O CMC comparou o melhor caminho das três rotas definidas A, B e C, sendo identificados os trechos com maior continuidade de vegetação, maior resistência e pontos estratégicos para restauração (Shirabe, 2018). Essa abordagem foi útil na definição da proposta de corredor ecológico.

Dentre as alternativas analisadas, o Corredor A destacou-se como o mais adequado para a implantação, por apresentar maior continuidade de vegetação nativa (307 ha), ausência de núcleos urbanos e melhor alinhamento com as APPs. Essas características indicam uma menor resistência da paisagem e maior potencial de conectividade funcional, conforme corroborado pela aplicação da metodologia de Caminho de Menor Custo (CMC), que identificou esta como a rota mais eficiente para o fluxo ecológico entre as unidades de conservação (BALBI et al., 2019). Contudo, a continuidade desta rota é desafiada por barreiras antrópicas nas rodovias BR-020 e DF-128, cujos picos de resistência exigem a instalação estratégica de passagens de fauna. Apesar desses obstáculos físicos, a viabilidade jurídica e política do Corredor A é superior e coincide predominantemente com eixos hídricos e APPs. Essa convergência com a legislação ambiental vigente simplifica a implementação da conectividade biológica ao reduzir a demanda por desapropriações em terras privadas ou de reforma agrária.

A análise socioambiental evidenciou que fatores como a presença de propriedades privadas, áreas de reforma agrária e a expansão urbana influenciam diretamente a viabilidade de implementação dos corredores ecológicos. A proximidade com núcleos urbanos e rodovias pode gerar conflitos de uso do solo e elevar os custos associados à implantação, especialmente no que se refere à desapropriação e compensação ambiental.

O corredor C, embora apresente elevada cobertura de vegetação savânica, caracteriza-se por maior extensão territorial e maior fragmentação, devido à presença de pastagens e mosaicos de uso, o que pode comprometer sua eficiência. Já o corredor B apresentou as condições menos favoráveis, com maior presença de áreas urbanizadas e menor continuidade de vegetação nativa, configurando-se como a alternativa de menor viabilidade ecológica.

Mesmo diante desses desafios, o corredor A mantém-se como a alternativa mais viável, uma vez que atravessa áreas com menor densidade urbana e apresenta menor complexidade fundiária, o que tende a reduzir conflitos e facilitar sua implementação. Esse resultado reforça a importância de integrar critérios ecológicos e socioeconômicos na definição de estratégias de conectividade e indicando a necessidade de intervenções de restauração ecológica e planejamento territorial.

Por fim, a integração de geoprocessamento e análise multiespectral demonstra viabilidade técnica para a restauração da conectividade ecológica no Distrito Federal. Fundamentado em McGarigal *et al*. (2012) e Cushman & McGarigal (2020), este estudo oferece ferramentas práticas para a gestão do Cerrado, orientando o planejamento de corredores que alinham a conservação da biodiversidade às exigências da legislação ambiental.

Considerações Finais

As análises realizadas evidenciaram que a paisagem do Distrito Federal passou por intensas transformações nas últimas décadas, marcadas pela substituição da vegetação nativa do Cerrado por áreas urbanas e agrícolas. Este processo resultou em um cenário de elevada fragmentação e redução da conectividade ecológica, no qual a Estação Ecológica de Águas Emendadas (ESEC-AE) e o Parque Nacional de Brasília (PNB) encontram-se atualmente isolados por uma matriz predominantemente antrópica, o que compromete o fluxo gênico e a manutenção da biodiversidade regional.

A metodologia adotada, baseada na integração de dados de uso e cobertura do solo com ferramentas de geoprocessamento e modelagem de custo, demonstrou-se eficiente para a identificação de áreas prioritárias e para a proposição de corredores ecológicos, apresentando alto potencial de replicação em diferentes contextos territoriais. Ressalta-se, contudo, que a aplicação dessa abordagem deve sempre considerar as especificidades locais, incluindo fatores climáticos, hidrológicos e socioeconômicos, para garantir a aderência às dinâmicas regionais.

Dentre as alternativas analisadas, o Corredor A apresentou as condições mais favoráveis para a promoção da conectividade entre as unidades de conservação, em função de sua maior continuidade de vegetação nativa, menor interferência antrópica e alinhamento estratégico com áreas de preservação permanente. No entanto, sua implementação efetiva está condicionada à superação de barreiras físicas críticas, como as rodovias BR-020 e DF-128. Nesse sentido, destacam-se como medidas essenciais a implantação de estruturas de travessia de fauna, passagens subterrâneas e aéreas, associadas a cercamentos direcionadores, além de estratégias de ordenamento territorial e educação ambiental junto às comunidades locais.

Embora a ausência de dados empíricos sobre a fauna local seja uma limitação para quantificar a perda direta de biodiversidade, a modelagem aqui apresentada serve como um indicador robusto para a conservação de espécies-alvo do Cerrado, como o lobo-guará (*Chrysocyon brachyurus*) e o tamanduá-bandeira (*Myrmecophaga tridactyla*), que dependem de áreas extensas e conectadas para sobreviver.

Por fim, conclui-se que a implementação de corredores ecológicos constitui uma estratégia fundamental para a conservação da biodiversidade e para o aumento da resiliência dos ecossistemas frente às mudanças ambientais. Dentre as alternativas analisadas, o Corredor A destacou-se como o mais adequado, não apenas por sua superioridade ecológica, mas também por sua viabilidade jurídica. Essa viabilidade é reforçada pelo fato de o traçado estar em conformidade com o Código Florestal (Lei 12.651/2012) ao priorizar a recuperação de Áreas de Preservação Permanente (APPs), o que facilita a captação de recursos para restauração ecológica e reduz conflitos fundiários. Nesse sentido, recomenda-se que este traçado seja incorporado formalmente às diretrizes do Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal (ZEE-DF), servindo como base técnica para o planejamento de infraestrutura verde. Pesquisas futuras deverão focar na validação desta rota através de dados de telemetria ou genética de populações, conforme sugerido por Zeller *et al*. (2012), para refinar os valores de resistência e garantir que o fluxo biológico atenda plenamente às necessidades das espécies na região.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) através do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2025. Agradecemos também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais- PPGCA/UnB pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

Referências Bibliográficas

ADRIAENSEN, F. et al. **The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model**. Landscape and Urban Planning, v. 64, p. 233–247, 2003

BALBI, M., PETIT, EJ, CROCI, S., NABUCET, J., GEORGES, R., MADEC, L., ERNOULT, A., 2019. **Relevância ecológica da análise do caminho de menor custo: um método de fácil implementação para o planejamento urbano da paisagem.** J. Environ. Manage. 244, 61– 6

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Código Florestal Brasileiro. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2012.

CUSHMAN, S. A.; McGARIGAL, K.; ZELLER, K. A. **Multi-Scale Habitat Selection Modeling: introduction to the special issue.** *Landscape Ecology*, v. 31, p. 1157–1160, 2016. DOI: 10.1007/s10980-016-0388-4.

DISTRITO FEDERAL. **Lei nº 6.269, de 29 de janeiro de 2019**. Institui o Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal (ZEE-DF). Diário Oficial do Distrito Federal, 2019

FAHRIG, L. Habitat fragmentation: **A long and tangled tale.** ***Global Ecology and Biogeography***, v. 28, n. 1, p. 33-41, 2019.

HADDAD, N. M. et al. **Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems**. *Science Advances*, v. 1, n. 2, p. e1500052, 2015.

MARTINS, M. J. **Elementos da infraestrutura verde e a promoção de serviços ecossistêmicos na cidade de João Pessoa/PB.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/22620.

McGARIGAL, K.; CUSHMAN, S. A.; ENE, E. FRAGSTATS v4 – **Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps. Computer software.** Amherst: Universidade de Massachusetts, 2012.

SHIRABE, T., 2018. **Caminhos de custo mínimo agrupados ou com buffer não são corredores de custo mínimo: experimentos computacionais em modelos baseados em caminhos e em caminhos amplos para projeto de corredores de conservação e estimativa de distância efetiva**. Ecol. Inf. 44, 109–116.

TURNER, M. G.; GARDNER, R. H.; O'NEILL, R. V. ***Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process*.** 2. ed. New York: Springer, 2015.

ZELLER, K. A.; McGARIGAL, K.; WHITELEY, A. R. **Estimating landscape resistance to movement: a review**. Landscape Ecology, v. 27, p. 777–797, 2012.

MODELAGEM ESTATÍSTICA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE EM SANTO ANDRÉ (SP): DETERMINANTES MORFOLÓGICOS E AMBIENTAIS

1 Thiago Bueno de Araujo, 2 Angela Terumi Fushita
1 Universidade Federal do ABC, e-mail:thiagob.araujo@hotmail.com; 2 Universidade Federal do ABC, e-mail: angela.fushita@ufabc.edu.br

Palavras-chave: ilha de calor urbana, sensoriamento remoto, arborização urbana

Resumo

A urbanização com o aumento da impermeabilização da superfície tem sido considerada a causa das anomalias microclimáticas conhecidas como Ilhas de Calor Urbanas (ICU). Oo município de Santo André, integrante da região metropolitana da Grande São Paulo e do ABC Paulista apresenta distribuição desigual da arborização no tecido urbano, o que pode intensificar as ICUs e as desigualdades territoriais já observadas. Este trabalho tem como objetivo investigar a influência das variáveis morfológicas e ambientais no campo térmico de Santo André por meio de modelagem geoestatística e sensoriamento remoto. Foram utilizados dados do satélite Landsat para estimativa da temperatura de superfície, associados a malha de setores censitários e a técnicas de análise espacial, incluindo estatística multivariada e autocorrelação espacial, para analisar se há a correlação entre o Índice de Verticalização e a densidade de arborização na modulação das Temperaturas de Superfície (LST), utilizando o Índice de Moran para mapear clusters críticos. Os resultados evidenciam a formação de clusters térmicos associados a áreas densamente urbanizadas, com baixa cobertura vegetal e maior presença de materiais impermeáveis, enquanto áreas com maior presença de vegetação e proximidade de corpos hídricos apresentaram efeito de resfriamento. A análise espacial demonstrou que as ilhas de calor não se distribuem de forma isolada, mas seguem padrões agregados e interdependentes no território urbano. Os achados reforçam o papel estratégico da infraestrutura verde na mitigação do aquecimento urbano e destacam a importância de políticas públicas integradas para o planejamento urbano sustentável. O estudo contribui ao fornecer subsídios técnicos para ações de adaptação climática, com foco na ampliação de áreas verdes e na melhoria da qualidade ambiental nas cidades.

Introdução

O processo de urbanização acelerada nas metrópoles brasileiras tem promovido mudanças significativas no uso e cobertura da terra, caracterizadas pela substituição de áreas vegetadas por superfícies impermeáveis, como concreto e asfalto, o que intensifica as anomalias microclimáticas conhecidas como Ilhas de Calor Urbanas (ICU) (LI et al., 2023). Esse fenômeno resulta no aumento da temperatura da superfície e do ar em áreas urbanas, impactando diretamente o conforto térmico, a qualidade ambiental e a saúde pública, especialmente em regiões densamente urbanizadas (SANTAMOURIS, 2020). No município de Santo André, localizado na Região Metropolitana de São Paulo e inserido em um contexto histórico-industrial associado ao Polo Petroquímico do ABC Paulista, essas dinâmicas são potencializadas pela elevada heterogeneidade do uso do solo, o que reforça a necessidade de análises espaciais baseadas em geotecnologias para a compreensão das variações térmicas intraurbanas (AMORIM et al., 2022).

A morfologia urbana exerce papel determinante na modulação do clima urbano, sendo influenciada por parâmetros como densidade construtiva, altura das edificações e Índice de Verticalização (IV). Estudos recentes indicam que o adensamento urbano contribui para a retenção de calor por meio do efeito de cânion urbano, reduzindo a ventilação e aumentando a absorção de radiação pelas superfícies construídas (OKE et al., 2021). Por outro lado, a verticalização pode atuar como fator mitigador ao promover sombreamento sobre superfícies pavimentadas, reduzindo a incidência direta de radiação solar e, consequentemente, as temperaturas superficiais (YANG et al., 2022). Essa dualidade evidencia a complexidade das interações entre forma urbana e microclima, exigindo abordagens quantitativas para melhor compreensão desses efeitos.

Em contraste, a infraestrutura verde tem sido amplamente reconhecida como uma estratégia eficaz para mitigação das ilhas de calor urbanas. A vegetação atua por meio de mecanismos como sombreamento e evapotranspiração, promovendo redução significativa das temperaturas do ar e da superfície (BOWLER et al., 2021). No entanto, a distribuição espacial desigual da arborização em áreas urbanas pode gerar padrões de segregação térmica, nos quais regiões com menor cobertura vegetal apresentam maior exposição ao calor (NORTON et al., 2021). A eficácia do resfriamento urbano está diretamente relacionada à densidade arbórea, à conectividade entre áreas verdes e à sua integração com o tecido urbano, reforçando a importância do planejamento territorial baseado em serviços ecossistêmicos (SHI et al., 2022).

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo investigar a influência das variáveis morfológicas e ambientais na temperatura de superfície da macrozona urbana de Santo André, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e modelagem geoestatística a partir de dados do satélite Landsat-9. Busca-se quantificar a correlação entre o Índice de Verticalização e a densidade de arborização na modulação da Temperatura de Superfície (LST), empregando o Índice de Moran para identificação de padrões espaciais e clusters térmicos críticos (LIU et al., 2022). A pesquisa justifica-se pela necessidade de gerar subsídios técnicos ao planejamento urbano sustentável, contribuindo para a mitigação de hotspots térmicos e o fortalecimento da resiliência climática em áreas metropolitanas (SANTAMOURIS, 2020).

Material e Métodos

A área de estudo é a macrozona urbana do município de Santo André (Estado de São Paulo) (Figura 01). Santo André é integrante da Região Metropolitana de São Paulo e do ABC Paulista e possui uma extensão territorial de aproximadamente 175 km², caracterizada pelo adensamento urbano e a conservação ambiental (SANTO ANDRÉ, 2016). O município é subdividido em Macrozona Urbana, ao norte, e a Macrozona de Proteção Ambiental, ao sul, que abriga mananciais e a Vila de Paranapiacaba (SANTO ANDRÉ, 2021). A Macrozona Urbana concentra as principais atividades econômicas e de serviços, apresentando um tecido consolidado com áreas de verticalização expressiva e pólos industriais remanescentes (SANTOS; RIBEIRO, 2023). Esta zona é marcada por uma infraestrutura viária densa que, somada à alta impermeabilização do solo, influencia diretamente o microclima local e a formação de ilhas de calor (ARANHA et al., 2022).

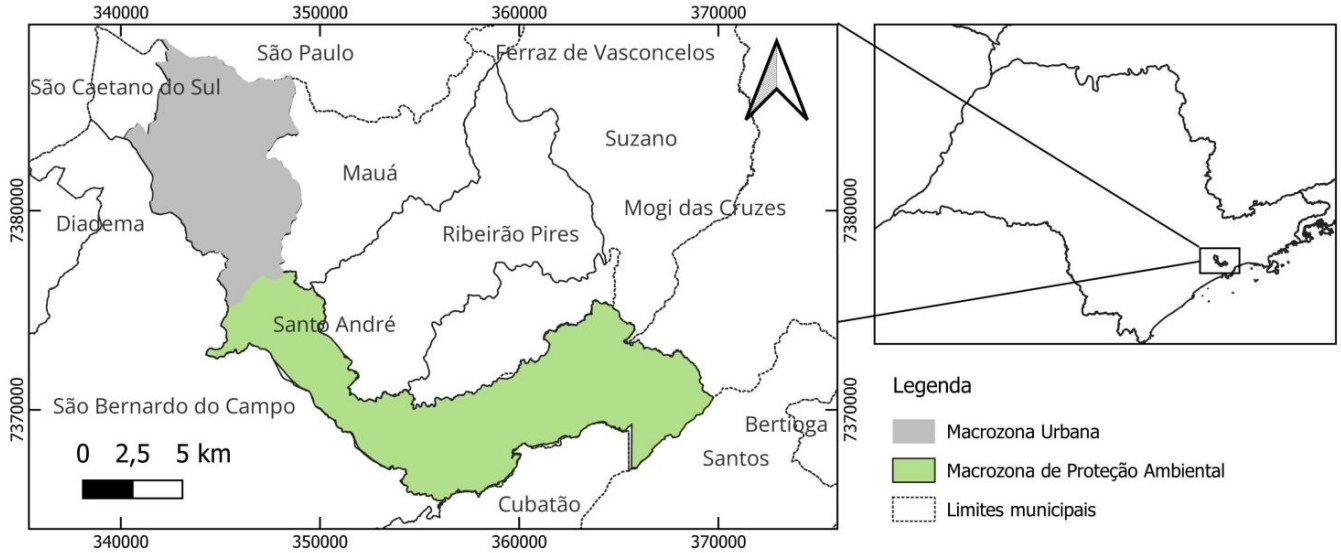


Figura 015: Localização da área de estudo. Fonte: Autores (2026).

A Temperatura de Superfície (LST - *Land Surface Temperature*) na macrozona urbana de Santo André (Sp) foi estimada por meio do processamento imagens do sensor TIRS-2 a bordo do satélite Landsat-9 (Collection 2, Nível 2) na plataforma *cloud-based* Google Earth Engine. Aplicou-se a correção de emissividade superficial (ε) e os valores de radiância para temperatura em graus Celsius o proposto por Avdan e Jovanovska (2016). Os *pixels* com valores de LST superiores à média municipal acrescida de um desvio padrão $(LST > \mu + 1\sigma)$ foram classificados como Ilhas de Calor Urbanas (ICU). Inversamente, as Ilhas de Frescor Urbanas (IFU) foram delimitadas pelos valores inferiores à média subtraída de um desvio padrão $(LST > \mu - 1\sigma)$.

O Índice de Verticalização (IV) foi obtido a partir dos dados do Censo Demográfico (IBGE,2022), sendo calculado pela razão entre o número de domicílios particulares permanentes do tipo 'apartamento' e o total de domicílios por setor censitário. Para a Densidade de Arborização, realizou-se uma junção espacial (*spatial join*) entre o inventário de indivíduos arbóreos (vetor) e a malha censitária, permitindo a contagem absoluta de espécimes por setor. Esta variável foi normalizada pela área da unidade territorial (ind./km^2).

Para verificar a existência de padrões de agrupamento ou dispersão no território municipal, aplicou-se o Índice de Moran Global (I) para temperatura de superfície (LST), verticalização (IV) e densidade de arborização. O valor do índice varia de -1 a +1, onde valores positivos indicam a presença de clusters (áreas similares próximas entre si) e valores negativos indicam dispersão. A significância estatística do índice foi testada sob a hipótese nula de aleatoriedade espacial, considerando um nível de confiança de 95% ($p < 0,05$).

Para a identificação de padrões locais e clusters , aplicou-se o método LISA (Local Indicators of Spatial Association) proposto por Anselin (1995) e decompõe o índice global em indicadores locais, revelando outliers e agrupamentos espaciais estatisticamente significativos (ANSELIN; BERA, 1998). A escolha do critério de contiguidade do tipo "Rainha" baseia-se na necessidade de capturar interações espaciais em todas as direções de contato, conforme as recomendações de Lloyd (2010) para estudos de geografia urbana.

O método LISA classificou os setores censitários em quatro quadrantes de associação: Q1 -Alto-Alto (áreas com valores elevados da variável cercadas por vizinhos com valores igualmente altos e foram considerados clusters críticos); Q4 - Baixo-Baixo (áreas com baixos valores cercadas por vizinhos com baixos valores);Q2 - Alto-Baixo e Q3 - Baixo-Alto (setores que apresentam comportamento discrepante em relação à sua vizinhança imediata, ou seja, outliers).

Todas as rotinas estatísticas foram executadas em ambiente R (versão 4.6.0), utilizando os pacotes sf para manipulação de dados vetoriais. A relação entre as variáveis foi examinada por meio de modelos de Regressão Linear Múltipla (Ordinary Least Squares - OLS), adotando-se a média de LST por setor como variável dependente. Utilizou-se o pacote spdep para o cálculo das matrizes de peso e testes de Moran.

Resultados e Discussão

Foram delimitados 190 polígonos como Ilha de Calor Urbana (ICU) em 56,54 ha e 134 polígonos de Ilha de Frescor Urbana (IFU) em 67,84 ha (Figura 02a). A temperatura de superfície (média para o ano de 2025) na macrozona urbana de Santo André variou entre 24,93ºC e 37,52ºC. Ao sul, estão as áreas com os menores valores de temperatura média anual e os maiores polígonos de IFU (Figura 02a), é a região do município próxima à unidade de conservação (Parque Natural Municipal do Pedroso) e à represa Billings, que influenciam na formação de IFU, apesar poucos registros indivíduos arbóreos por setor censitário (Figura 02c). Em contrapartida, polígonos menores e esparsos de IFU estão localizados em áreas com verticalização acima de 53% (Figura 02b). As regiões mais quentes da macrozona urbana de Santo André estão na porção central (ao longo do eixo da linha férrea) e ao norte (limítrofe do município de São Paulo e próximo ao Pólo Petroquímico).

O modelo de regressão linear múltipla foi aplicado com o objetivo de explicar a variação da Temperatura de Superfície (LST) (Figura 03a) a partir das variáveis independentes índice de verticalização (IV) (Figura 03b), número absoluto de indivíduos arbóreos (NArv) (Figura 02c) e densidade arbórea por área. O modelo final (LST = 32,11 - 0,0077. IV - 0,0053.NArv) apresentou significância estatística global elevada ($p = 2{,}23\times10^{-9}$), contudo com baixo poder explicativo, sendo responsável por apenas 2,5% da variabilidade da LST na macrozona urbana de Santo André. Embora as variáveis analisadas exerçam influência sobre o comportamento térmico urbano, a dinâmica da temperatura de superfície é multifatorial, envolvendo também aspectos como materiais urbanos, albedo, ventilação, umidade e características geomorfológicas não incorporadas ao modelo. A exclusão de 108 setores censitários do modelo representa uma limitação relevante, possivelmente associada à presença de nuvens nas imagens Landsat ou à influência de corpos hídricos extensos, que afetam a estimativa da LST. Essa restrição reduz a representatividade espacial da análise e pode influenciar na robustez dos resultados, especialmente em áreas de transição entre zonas urbanas e ambientais.

A análise dos resíduos, com variação entre -10,49 e 3,55, indica assimetria na capacidade preditiva do modelo. Observa-se melhor desempenho na estimativa de áreas com temperaturas elevadas (Ilhas de Calor), enquanto há maior erro na representação de áreas com temperaturas mais baixas (Ilhas de Frescor). Esse comportamento sugere que os fatores que contribuem para o resfriamento urbano são mais complexos e menos capturados pelas variáveis utilizadas, especialmente no que se refere à qualidade e estrutura da vegetação urbana.

O coeficiente do IV (β_1=-0,0077, $p < 0{,}001$) indica que o aumento do adensamento vertical está relacionado à redução da temperatura de superfície, sugerindo que, no contexto analisado, a verticalização atua como fator mitigador do aquecimento urbano, possivelmente devido ao efeito de sombreamento promovido pelas edificações e à formação de cânions urbanos, que reduzem a incidência direta de radiação solar sobre as superfícies impermeáveis. Esse comportamento contrasta com áreas predominantemente horizontais, onde a maior exposição solar e a elevada impermeabilização favorecem o acúmulo de calor, conforme observado na relação entre as Figuras 02a e 02b.

No que se refere à arborização urbana, embora a variável tenha apresentado significância estatística, o baixo coeficiente (β_2=0,0053, $p < 0{,}05$) indica uma contribuição limitada na explicação da variabilidade térmica. Esse resultado pode estar relacionado à forma como a variável foi representada no modelo, considerando apenas o número absoluto de indivíduos arbóreos ou sua densidade por área. Essa abordagem não contempla aspectos fundamentais para o resfriamento urbano, como o volume de copa, altura das árvores, área foliar e conectividade entre fragmentos vegetados, fatores reconhecidamente relevantes na regulação microclimática.

A análise de autocorrelação espacial evidenciou que tanto a temperatura de superfície quanto a densidade de arborização (Figura 03) apresentam padrões espaciais não aleatórios, caracterizados por agrupamentos geográficos bem definidos. O índice de verticalização foi não significativo.Observa-se que as Ilhas de Calor tendem a se concentrar em clusters de setores censitários com temperaturas elevadas e baixa densidade arbórea, enquanto as Ilhas de Frescor estão associadas a áreas com maior presença de vegetação, configurando padrões do tipo Alto-Alto e Baixo-Baixo, respectivamente. Esse comportamento espacial reforça a influência direta da cobertura vegetal na modulação térmica urbana e evidencia a existência de heterogeneidade microclimática no território analisado.

O Índice de Moran Global calculado para a temperatura de superfície apresentou valor de 0,778, com significância estatística elevada ($p < 0{,}001$), indicando forte autocorrelação espacial positiva. Esse resultado demonstra que áreas com temperaturas mais altas tendem a estar espacialmente associadas a regiões igualmente quentes, formando clusters contínuos de aquecimento urbano, conforme ilustrado na Figura 03a. Da mesma forma, áreas com temperaturas mais baixas também se agrupam espacialmente, validando a existência de Ilhas de Calor e Ilhas de Frescor claramente estruturadas no espaço urbano. Esse padrão confirma que a distribuição térmica não ocorre de forma dispersa, mas sim condicionada por fatores territoriais e ambientais que atuam de maneira integrada.

Para a variável densidade de arborização, o Índice de Moran Global apresentou valor de 0,558 ($p < 0{,}001$), evidenciando também autocorrelação espacial positiva significativa. Esse resultado indica que a infraestrutura verde no município não está distribuída de forma homogênea, mas concentrada em determinados setores com elevada densidade arbórea (clusters Alto-Alto), enquanto outras áreas apresentam déficit vegetacional contínuo (clusters Baixo-Baixo), conforme observado na Figura 03b. Essa segregação espacial da vegetação urbana sugere a existência de desigualdade na provisão de serviços ecossistêmicos, especialmente no que se refere à regulação térmica.

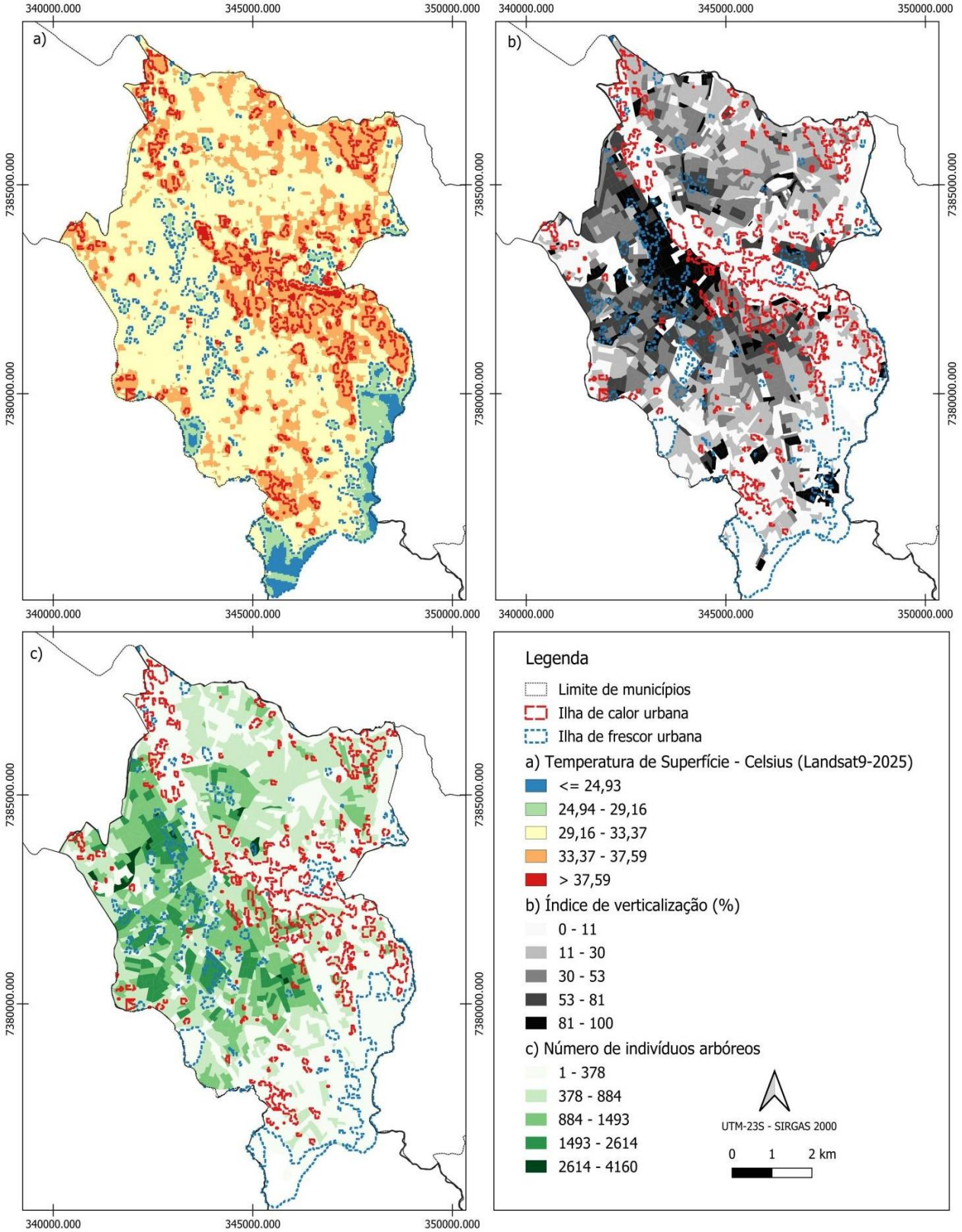


Figura 02: Representação espacial da macrozona urbana de Santo André, sendo: a) Temperatura de superficie; b) Índice de Verticalização e c) Arborização urbana Fonte: Autores (2026).

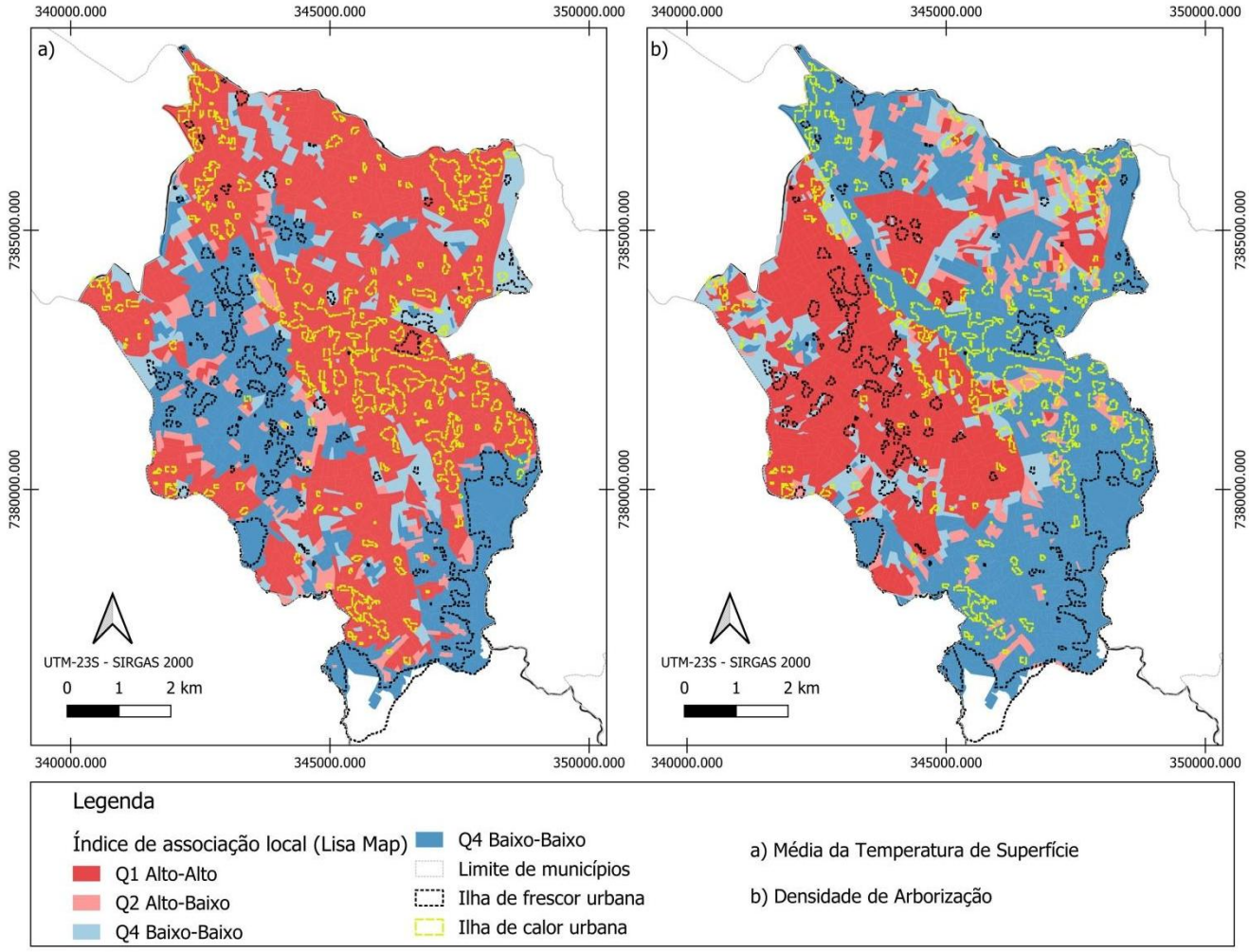


Figura 03: Mapa de associação local (Lisa Map) de a) Média da temperatura de superfície e b) Densidade de arborização. Fonte: Autores (2026).

A sobreposição dos padrões espaciais de temperatura de superfície e densidade de arborização permite inferir uma relação inversa entre essas variáveis, na qual áreas com menor cobertura vegetal tendem a apresentar temperaturas mais elevadas. Esse comportamento reforça o papel da vegetação urbana como elemento estruturante na mitigação das ilhas de calor, atuando por meio de processos como sombreamento e evapotranspiração. Por outro lado, a concentração de áreas com baixa densidade arbórea pode intensificar as disparidades microclimáticas entre diferentes setores da macrozona urbana de Santo André, contribuindo para a formação de hotspots térmicos persistentes.

De forma geral, os resultados da análise espacial indicam que tanto a temperatura de superfície quanto a arborização seguem uma lógica de organização territorial marcada por desigualdades estruturais, o que evidencia a necessidade de estratégias de planejamento urbano orientadas pela redistribuição da infraestrutura verde. A incorporação de análises geoestatísticas, como o Índice de Moran, mostra-se fundamental para a identificação de áreas prioritárias para intervenção, permitindo ações mais direcionadas na mitigação das ilhas de calor e na promoção de maior equilíbrio ambiental no espaço urbano.

Embora a regressão linear múltipla indicar que o Índice de Verticalização e o número de indivíduos arbóreos são preditores estatisticamente significativos da Temperatura de Superfície, o baixo coeficiente de determinação ajustado (R^2) contrasta com o elevado valor do Índice Global de Moran (I = 0,78), evidenciando limitações do modelo em capturar a complexidade do fenômeno térmico urbano. Esse descompasso sugere que a variabilidade espacial da temperatura em Santo André é fortemente influenciada por variáveis latentes não incorporadas na modelagem, como propriedades físico-termais dos materiais urbanos (albedo e capacidade térmica), dinâmica de circulação atmosférica local, proximidade a grandes eixos viários e industriais, além da influência de corpos hídricos de grande porte, como a Represa Billings. Esses fatores atuam de forma integrada na modulação do microclima urbano, reforçando a necessidade de abordagens mais robustas que transcendam modelos lineares tradicionais.

A aplicação do Índice de Moran permitiu superar parte dessas limitações ao evidenciar que as ICU, IFU e a distribuição da infraestrutura verde estão organizadas segundo padrões espaciais agregados e estatisticamente significativos. Diferentemente da estatística descritiva convencional, que trata as observações de forma independente, a análise espacial incorpora o efeito de vizinhança, revelando que os valores observados em um determinado setor censitário são influenciados pelas condições dos

setores adjacentes. Esse comportamento espacial reforça que o fenômeno das ilhas de calor não é pontual, mas sim sistêmico, estruturado por relações territoriais contínuas (IBGE, 2023).

Considerações finais

A integração da estatística multivariada com a análise espacial permitiu concluir que a questão climática de Santo André exige intervenções de escala regional. As estratégias de adaptação devem priorizar a ruptura dos clusters Alto-Alto (Hotspots) de temperatura de superfície identificados na Figura 02a, conectando fragmentos de vegetação para criar corredores de frescor que interceptam as manchas de calor contínuas da Macrozona Urbana de Santo André.

Este trabalho contribui com o diagnóstico socioeconômico e ambiental do município ao espacializar anomalias térmicas e fornecer subsídios quantitativos para políticas de adaptação climática baseadas em evidências. Recomenda-se, para estudos futuros, a inclusão de índices de biomassa foliar (como o LAI) e variáveis de uso do solo para aumentar a acurácia preditiva dos modelos climáticos urbanos; e direcionar um olhar para como variáveis espaciais latentes (como proximidade com a Represa Billings, Polo Petroquímico ou grandes eixos asfálticos) exercem maior influência sobre o clima urbano do que as

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, Processo 2025/07022-7 pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

AMORIM, M. C. C. T. et al. Urban climate and land use changes in Brazilian metropolitan areas. **Sustainable Cities and Society**, v. 82, p. 103870, 2022.

ANSELIN, L. Local indicators of spatial association—LISA. **Geographical Analysis**, v. 27, n. 2, p. 93–115, 1995.

ANSELIN, L.; BERA, A. K. Spatial dependence in linear regression models with an introduction to spatial econometrics. **Statistics Textbooks and Monographs**, v. 155, p. 237-290, 1998.

ARANHA, J. P. et al. Análise da temperatura de superfície e sua relação com o uso do solo em Santo André, SP. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 14, e20210042, 2022.

AVDAN, U.; JOVANOVSKA, G. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. **Journal of Sensors**, v. 2016, p. 1-8, 2016.

BOWLER, D. E. et al. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review. **Landscape and Urban Planning**, v. 97, p. 147–155, 2021.

GORELICK, N. *et al*. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017.

HIJMANS, R. J. **terra: Spatial Data Analysis**. R package version 1.7-71. [S. l.], 2024. Disponível em: https://CRAN.R-project.org/package=terra.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022**: primeiros resultados de população e domicílios. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/. Acesso em: 2 maio 2026.

LIU, Y. et al. Spatial autocorrelation analysis of land surface temperature. **Remote Sensing**, v. 14, n. 3, p. 589, 2022.

LLOYD, C. D. **Spatial Data Analysis**: An Introduction for GIS Users. Oxford: Oxford University Press, 2010.

MORAN, P. A. P. Notes on Continuous Stochastic Phenomena. **Biometrika**, v. 37, n. 1/2, p. 17-23, 1950.

NORTON, B. A. et al. Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 61, p. 127106, 2021.

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. **Urban climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

PEBESMA, E. Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. **The R Journal**, v. 10, n. 1, p. 439-446, 2018.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2026. Disponível em: https://www.R-project.org/.

SANTAMOURIS, M. Recent progress on urban overheating and heat island research. **Energy and Buildings**, v. 207, p. 109482, 2020.

SANTO ANDRÉ. **Lei nº 9.924, de 21 de dezembro de 2016**: Institui o Plano Diretor do Município de Santo André. Santo André: Prefeitura Municipal, 2016.

SANTO ANDRÉ. **Plano Municipal de Mata Atlântica de Santo André (PMMA)**. Santo André: Secretaria de Meio Ambiente, 2021.

SANTOS, L. M.; RIBEIRO, H. Transformações territoriais e a dinâmica industrial no ABC Paulista. **Estudos Geográficos**, v. 21, n. 1, p. 45-62, 2023.

SHI, Y. et al. Cooling effects of urban green infrastructure. **Building and Environment**, v. 215, p. 108943, 2022.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat 8-9 Surface Temperature Science Product: Level 2, Collection 2, Guide**. Reston, VA: USGS, 2022.

WICKHAM, H. *et al*. Welcome to the Tidyverse. **Journal of Open Source Software**, v. 4, n. 43, p. 1686, 2019.

YANG, J. et al. Urban morphology and thermal environment. **Sustainable Cities and Society**, v. 76, p. 103480, 2022.

WETLANDS CONSTRUÍDOS: A IMPORTÂNCIA NO DESENVOLVIMENTO DAS CIDADES

1 Gilka Torres Dueire Lins, 2 Robson Rodrigues da Anunciação Júnior, 3 Maria Luisa Bandeira Lima da Rocha, 4 Robson José Silva, 5 Vicente de Paulo Silva

1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: gilka.tdlins@gmail.com; 2 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: robson.anunciacaojunior@ufrpe.br; 3 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: malubands9638@gmail.com; 4 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: robson.josesilva@ufrpe.br; 5 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: vicente.psilva@ufrpe.br

Palavras-chave: Cidades sustentáveis; Jardins filtrantes; Soluções Baseadas na Natureza.

Resumo

A urbanização acelerada tem intensificado a impermeabilização do solo, resultando em alagamentos frequentes e na degradação da qualidade da água nas cidades. Diante desse cenário de vulnerabilidade ambiental, o presente trabalho tem como objetivo analisar a importância dos wetlands construídos (jardins filtrantes) na construção de cidades mais sustentáveis, com ênfase em sua aplicação no ambiente urbano. A metodologia consiste em uma pesquisa de abordagem qualitativa, com caráter exploratório e descritivo, fundamentada em revisão bibliográfica e na análise de exemplos reais nacionais e internacionais: Tanner Springs Park (Estados Unidos), Wetland modular BHTEC (Brasil), Parque do Caiara (Brasil), Orla de Piratininga (Brasil), Staten Island Bluebelt (Estados Unidos) e Qunli Wetland Park (China), abrangendo desde intervenções de microescala até sistemas regionais. Os resultados demonstram que os jardins filtrantes são soluções versáteis e eficientes, capazes de promover a fitorremediação de efluentes, o controle de cheias e a requalificação de áreas degradadas com custos inferiores aos das engenharias tradicionais. Conclui-se que os wetlands construídos representam uma alternativa estratégica para a promoção da resiliência urbana e adaptação às mudanças climáticas, integrando-se sinergicamente ao planejamento das cidades como infraestrutura verde multifuncional.

Introdução

A intensificação do processo de urbanização tem provocado grandes mudanças na dinâmica ambiental das cidades, principalmente pela redução significativa das áreas verdes e pelo aumento da impermeabilização do solo, comprometendo o equilíbrio dos sistemas naturais. A substituição de superfícies permeáveis por materiais artificiais, como o asfalto e concreto, altera significativamente o comportamento hidrológico, dificultando a infiltração da água e intensificando o escoamento superficial, o que contribui para a ocorrência de alagamentos em áreas urbanas (Silva et al., 2024).

Esse processo de impermeabilização compromete a capacidade natural do solo de absorver e armazenar água, elevando a velocidade do escoamento superficial e sobrecarregando os sistemas de drenagem urbana (Silva et al., 2024). Como consequência, os alagamentos e enchentes tornam-se mais frequentes, sobretudo em áreas densamente urbanizadas. Esses eventos, além dos danos materiais, estão diretamente associados a riscos à saúde pública, favorecendo a disseminação de doenças de veiculação hídrica, como leptospirose, hepatite A e infecções gastrointestinais, especialmente em populações socialmente vulneráveis (Organização Mundial da Saúde, 2023).

Paralelamente, a piora da qualidade da água e a crescente pressão sobre os recursos hídricos evidenciam um cenário de vulnerabilidade ambiental. O aumento da poluição difusa proveniente do escoamento urbano e a crescente demanda por água intensificam problemas relacionados à escassez hídrica e à degradação dos corpos d'água (Nuamah et al., 2020). Além disso, o escoamento superficial atua como facilitador no transporte de poluentes acumulados nas superfícies das cidades, como resíduos sólidos, carregados para os corpos hídricos sem tratamento prévio, comprometendo a qualidade da água, reduzindo sua disponibilidade para abastecimento e agravando problemas ambientais, como a eutrofização e a perda de biodiversidade aquática (Organização Mundial da Saúde, 2023).

No contexto atual, o manejo das águas urbanas demanda abordagens que ultrapassem soluções baseadas exclusivamente na engenharia tradicional. Nesse cenário, as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) emergem como um novo paradigma ao mimetizar processos naturais para regenerar funções ecológicas nas cidades (Herzog, 2020). Desse modo, os wetlands construídos (WC), também conhecidos como jardins filtrantes, são sistemas projetados para reproduzir processos típicos de zonas úmidas sob condições controladas de engenharia, envolvendo a interação entre vegetação, substrato, microrganismos e água, com o objetivo de promover retenção, infiltração e melhoria das condições da água (Stefanakis, 2019). Esses sistemas integram soluções de drenagem urbana, tratamento natural da água e requalificação ambiental, além de serem aplicados no tratamento descentralizado de efluentes sanitários, evidenciando sua versatilidade na gestão hídrica urbana.

Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo analisar a importância dos jardins filtrantes na construção de cidades mais sustentáveis, com ênfase em sua aplicação no ambiente urbano. O estudo tem como foco a apresentação de exemplos reais de wetlands construídos implementados em diferentes cidades, tanto no Brasil quanto no exterior, certificando sua possibilidade em áreas urbanas consolidadas, independentemente de escala ou localização. Vale ressaltar que esses sistemas podem ser incorporados ao espaço urbano de forma integrada, não estando restritos a áreas afastadas ou de grande extensão, mas podendo ser aplicados em diferentes contextos e dimensões.

Materiais e Métodos

O estudo possui abordagem qualitativa, com caráter exploratório e descritivo, sendo desenvolvido a partir de revisão bibliográfica associada à análise de exemplos reais referentes à aplicação de wetlands construídos em ambientes urbanos. Adota-se, ainda, uma abordagem analítica-comparativa, com o objetivo de sistematizar e confrontar diferentes experiências de aplicação desses sistemas em contextos urbanos distintos. A etapa de revisão bibliográfica teve como objetivo fundamentar a discussão conceitual acerca dos jardins filtrantes, uma das principais abordagens das soluções baseadas na natureza à gestão das águas urbanas. Para isso, foram utilizados artigos científicos, livros, relatórios técnicos e documentos institucionais publicados, prioritariamente, entre 2015 e 2025, buscando contemplar abordagens mais recentes sobre o tema. A seleção dos materiais considerou a relevância para o contexto urbano e a relação direta com a aplicação prática de wetlands construídos, utilizando como principais termos de busca “wetlands construídos”, “jardins filtrantes”, “infraestrutura verde”, “constructed wetlands”, “soluções baseadas na natureza” e “nature-based solutions”.

Além da fundamentação teórica, o trabalho foi estruturado a partir da análise de seis exemplos práticos, escolhidos de forma intencional, com base em critérios previamente definidos. Foram selecionados exemplos nacionais e internacionais, considerando sua aplicação em áreas urbanas consolidadas e diferentes proporções. A seleção baseou-se nos seguintes critérios: inserção em contexto urbano consolidado; reconhecimento técnico ou institucional na literatura; disponibilidade de informações sobre características operacionais e desempenho; e representatividade em diferentes escalas de aplicação (micro, pequena, média e grande escala).

A partir desses critérios, os casos foram organizados de forma a permitir uma leitura progressiva das aplicações, considerando não apenas a escala, mas também a complexidade funcional e o grau de integração urbana dos sistemas. Inicialmente, optou-se pela apresentação do Tanner Springs Park (pequena escala), por se tratar de um exemplo didático e de fácil compreensão da inserção de wetlands no meio urbano, seguido do sistema modular BHTEC (microescala), que aprofunda a discussão sob uma perspectiva mais técnica e sanitária. Em seguida, são analisados os casos em escala intermediária, representados pelo Parque do Caiara e pela Orla de Piratininga, que evidenciam a integração entre drenagem, tratamento e requalificação urbana. Por fim, os exemplos em grande escala são apresentados a partir do Staten Island Bluebelt, que enfatiza a função de infraestrutura de drenagem regional, seguido pelo Qunli Wetland Park, que amplia a discussão ao incorporar uma abordagem mais voltada à integração ecológica e ao desenho urbano.

Essa seleção permite contemplar desde intervenções pontuais e descentralizadas até sistemas estruturantes de drenagem urbana, possibilitando analisar como os wetlands construídos se adaptam a diferentes demandas, níveis de complexidade e contextos urbanos. A análise foi conduzida a partir da interpretação das informações disponíveis na literatura e nos documentos técnicos dos projetos. Para fins de padronização da análise, foram definidas as seguintes variáveis: (i) escala de implantação; (ii) área do sistema; (iii) função predominante (drenagem, tratamento ou regulação hídrica); (iv) contexto urbano de inserção; e (v) principais contribuições.

Resultados e Discussão

Os wetlands construídos, quando aplicados ao contexto urbano, apresentam desempenho diretamente associado às condições de implantação, ao dimensionamento dos sistemas e às funções que desempenham no território. Aspectos como a área disponível, a configuração hidráulica e o tipo de fluxo adotado influenciam a eficiência desses sistemas, especialmente no que se refere ao controle do escoamento superficial, à melhoria das condições da água e à sua integração com o espaço urbano. Com base nesses aspectos, são analisados os seguintes casos, em sequência: Tanner Springs Park (Estados Unidos), sistema modular BHTEC (Brasil), Parque do Caiara (Brasil), Orla de Piratininga (Brasil), Staten Island Bluebelt (Estados Unidos) e Qunli Wetland Park (China).

O sistema **Tanner Springs Park**, localizado na cidade de Portland, nos Estados Unidos, é um exemplo representativo da aplicação de wetlands construídos em pequena escala inseridos em áreas urbanas densamente ocupadas, pautados no conceito de "descascar" a malha urbana cinza para restaurar processos hidrológicos. Inaugurado em 2005, o parque possui aproximadamente 3.600 m² e foi estabelecido em uma área anteriormente industrial, integrando-se ao processo de requalificação urbana do distrito Pearl. Segundo o Governo de Portland (2026), o sistema foi projetado a partir da recuperação das características ecológicas originais do local, historicamente associado a áreas úmidas, incorporando um wetland superficial capaz de reter e tratar águas pluviais provenientes do entorno urbano. A água do escoamento superficial é direcionada para uma área rebaixada do terreno, onde ocorre seu armazenamento temporário e posterior infiltração, associada à atuação de vegetação macrófita nativa e processos naturais de filtragem. Esses mecanismos permitem a remoção de sedimentos e poluentes, contribuindo para a melhoria da qualidade da água em escala local.

O projeto foi concebido como um parque hídrico urbano que incorpora características de zonas úmidas naturais ao ambiente construído, com um sistema de tratamento superficial integrado ao espaço público, composta por substrato arenoso e vegetação adaptada (Kim, 2015). Nesse sistema, a água percorre diferentes etapas de filtragem natural, sendo posteriormente tratada por lâmpadas UV e recirculada no próprio parque, o que reforça a integração entre processos ecológicos e infraestrutura urbana densa, como pode ser observado na Figura 01.



Figura 01: Vista geral do Tanner Springs Park.
Fonte: Lucas Kerper (2024)

Observa-se a presença de lâmina d'água, vegetação macrófita e passarelas elevadas, que permitem o uso público do espaço sem comprometer seu funcionamento. Por sua vez, o projeto incorpora elementos que remetem à memória ambiental do local, como a utilização de trilhos de trem reciclados para a composição do fechamento e contenção do wetland, relacionando a paisagem original da área através do novo contexto urbano (Kim, 2015). De modo funcional e urbano, o Tanner Springs Park atua como sistema descentralizado de manejo de águas pluviais, ao mesmo tempo que promove a requalificação de uma área anteriormente ocupada por usos industriais e caracterizada por forte impermeabilização do solo. Sua implementação contribuiu para a valorização da redondeza e para a consolidação da área como espaço urbano desenvolvido ambientalmente. O projeto demonstra que wetlands construídos podem ser incorporados ao ambiente urbano de forma integrada, especialmente em escala local, apresentando maior efetividade no manejo descentralizado do escoamento, com atuação mais direcionada ao manejo local do escoamento e à qualificação ambiental do espaço urbano.

Além da aplicação em pequena escala associada ao espaço público, a nova tendência é o modelo de wetland compacto, em proporção ainda menor, voltado ao tratamento descentralizado de efluentes. Nesse contexto, destaca-se o sistema **Wetlands Modular BHTEC,** desenvolvido no Centro de Inovação em Engenharia e Tecnologia, em Belo Horizonte (MG), em 2023, ocupando 12 m² e com capacidade de tratamento de até 7,5 m³/dia, comprovando a possibilidade de inserção desses sistemas em espaços urbanos limitados (Wetlands Construídos, 2024).

O sistema é composto por unidades pré-fabricadas, no modelo “plug and play”, o que permite sua instalação em diferentes contextos urbanos, com uma menor necessidade de obras civis. Em relação à estrutura, os módulos são impermeabilizados e preenchidos com meio filtrante e vegetação adaptada, possibilitando a remoção de poluentes por processos físicos, químicos e biológicos. Vale ressaltar ainda que sua concepção favorece a flexibilidade de aplicação, podendo ser implementado em áreas mais restritas, como condomínios, escolas, indústrias, viabilizando o reúso local da água para fins não potáveis e a mineralização do lodo no próprio leito filtrante, o que reduz drasticamente a demanda por manutenção externa e transporte de resíduos. Essa configuração compacta destaca a importância do adequado dimensionamento e operação do sistema, especialmente em situações de variação de carga e vazão.

A Figura 02 apresenta o sistema implantado no BH-TEC, atestando sua configuração compacta e a integração paisagística com o ambiente. Estudos indicam que wetlands compactos apresentam elevada eficiência na remoção de matéria orgânica, nutrientes e sólidos suspensos, com desempenho comparável a sistemas convencionais, especialmente quando associados a configurações híbridas de tratamento (Satyendra; Vijay, 2025).



Figura 02: Wetland modular compacto BHTEC.
Fonte: Wetlands Construídos (2023)

Tecnicamente, o sistema BHTEC foca no tratamento sanitário descentralizado, favorecendo para a melhoria da qualidade da água e redução da carga poluidora. O projeto configura-se como uma solução urbana replicável e de fácil implementação, transformando o efluente de um passivo ambiental em um recurso estratégico para a circularidade hídrica das cidades, especialmente em contextos com limitação de espaço, demonstrando o potencial dos wetlands construídos em microescala, sobretudo quando inseridos como soluções descentralizadas e complementares ao saneamento urbano.

Ampliando a análise de aplicação em contextos urbanos mais complexos, destacam-se iniciativas em escala intermediária que integram wetlands construídos ao planejamento da cidade, articulando funções de drenagem, qualificação ambiental e uso público. Nesse contexto, o sistema **Parque do Caiara**, localizado em Recife (PE), configura-se, desde 2023, como um exemplo relevante da aplicação de jardins filtrantes em área urbana consolidada. Elaborado no âmbito do “Plano Recife 500 Anos” e coordenado por instituições locais em parceria com o poder público, o sistema de jardins filtrantes do Parque do Caiara foi concebido como uma solução baseada na natureza para o tratamento de águas urbanas e requalificação ambiental. O

sistema atua diretamente sobre o Riacho do Cavouco, corpo hídrico com aproximadamente 5,5 km de extensão que recebe contribuições de esgoto doméstico e poluição difusa ao longo de seu percurso. A estrutura possui cerca de 7.000 m² de área total, com unidades filtrantes que tratam aproximadamente 350 m³/dia, utilizando processos naturais de fitorremediação, sem adição de produtos químicos (ARIES, 2023).

Do ponto de vista técnico, os jardins filtrantes são compostos por tanques com camadas de substrato e vegetação macrófita, que promovem a remoção de poluentes por meio da interação entre plantas, microrganismos e meio filtrante. Esse processo permite a redução significativa da carga poluidora antes que a água alcance o Rio Capibaribe, podendo atingir níveis de até 90% de redução de poluição em determinados parâmetros de qualidade da água, conforme dados operacionais da administração responsável (Trajano, 2026), provando alta eficiência adaptativa às condições de clima tropical. Adicionalmente, o sistema opera como infraestrutura verde integrada ao parque, associando funções hidráulicas, ecológicas e paisagísticas em um único espaço (ARIES, 2023). A Figura 03 ilustra a configuração dos jardins filtrantes no Parque do Caiara, apontando sua integração ao ambiente urbano e paisagístico.



Figura 03: Jardins filtrantes do Parque do Caiara.
Fonte: Diego Galba (2023)

O projeto do Parque do Caiara ultrapassa a função técnica de drenagem e tratamento, consolidando-se como uma estratégia de requalificação urbana e valorização territorial. A área, anteriormente marcada pela presença de um lixão, foi transformada em um espaço público estruturado e ambientalmente funcional, cooperando para a valorização do entorno e redução de custos com soluções convencionais de drenagem. Por sua vez, o parque assume papel relevante na educação ambiental, recebendo visitas técnicas, aulas de campo e atividades com escolas e universidades, consolidando o espaço como um "Laboratório Vivo" para tecnologias de resiliência urbana. O reconhecimento dessas iniciativas é evidenciado pela obtenção de prêmios em âmbito nacional, reforçando a relevância do projeto no cenário brasileiro de soluções baseadas na natureza (ARIES, 2023). Desse modo, o desempenho técnico e os benefícios socioambientais observados constatam a importância da gestão contínua e do monitoramento do sistema para a manutenção de sua eficiência, reforçando o potencial dos wetlands construídos como soluções multifuncionais em escala intermediária, especialmente quando integrados ao planejamento urbano e às estratégias de requalificação territorial.

Seguindo a perspectiva de integração entre infraestrutura ambiental e requalificação urbana, em uma escala mais abrangente, o sistema **Parque Orla de Piratininga Alfredo Sirkis**, inaugurado em 2024 na cidade de Niterói (RJ) destaca-se como um dos principais projetos de soluções baseadas na natureza do Brasil, contando com 680.000 m² (CAF, 2023). Situado às margens da Lagoa de Piratininga, o sistema wetland ocupa cerca de 35.290 m² da área total do parque e atua no tratamento dos efluentes das bacias hidrográficas dos rios Cafubá, Jacaré e Arrozal, de forma 100% natural. Ademais, o parque inclui áreas de praça, mirantes, píeres e um centro ecocultural com foco em educação ambiental (Niterói, 2026).

O sistema foi projetado para mitigação da poluição causada pelos efluentes provenientes das bacias hidrográficas contribuintes, fortemente caracterizada principalmente pela presença de sólidos suspensos oriundos do escoamento superficial e matéria orgânica associada ao lançamento de esgotos domésticos (Niterói, 2026). Diante desse cenário, os jardins filtrantes atuam como wetlands construídos capazes de interceptar, reter e tratar tanto cargas difusas quanto contribuições de esgoto, desempenhando papel relevante na recuperação ambiental da Lagoa de Piratininga (Rezende et al., 2022). Segundo a Phytorestore (2026), possui capacidade para tratar uma vazão média de 170.000 m³/dia de água, onde o sistema funciona como uma barreira sanitária natural que reduz a carga orgânica e de nutrientes, prevenindo a eutrofização da lagoa.

O parque ainda incorpora elementos de drenagem sustentável e paisagismo em um sistema multifuncional de grande escala. Os sistemas convencionais de bocas de lobo associados aos jardins de chuva e às biovaletas promovem a infiltração, retenção e retardamento do escoamento superficial, contribuindo para a prevenção e mitigação de alagamentos urbanos, além de evitar sobrecarga hidráulica nos tanques filtrantes em cenários extremos. Essa integração entre soluções baseadas na natureza e infraestrutura convencional evidencia uma abordagem híbrida, essencial para o funcionamento do sistema em contextos urbanos complexos. A Figura 04 apresenta a configuração dos jardins filtrantes ao longo da orla da Lagoa de Piratininga, salienta sua integração ao sistema de drenagem urbana e ao desenho paisagístico do parque. Esse aspecto evidencia que a integração com dispositivos complementares de drenagem potencializa o desempenho dos wetlands construídos, especialmente em cenários de maior variabilidade hidrológica.



Figura 04: Jardins filtrantes da Orla Piratininga.
Fonte: Jair Lanes (2024)

O projeto contribui para a recuperação ecológica da área ao promover a recomposição da vegetação nativa e a melhoria das condições ambientais da Lagoa de Piratininga, favorecendo o restabelecimento de habitats e o aumento da biodiversidade local. Do ponto de vista urbano, representa a requalificação de uma área marcada pela degradação da qualidade da água e pelo lançamento de efluentes, transformando-a em um espaço público de convivência. A presença de equipamentos como o centro ecocultural reforça seu papel na educação ambiental, enquanto as premiações em níveis nacional e internacional confirmam seu destaque como referência em infraestrutura verde. Além disso, o sistema integra estratégias de saneamento, drenagem e planejamento urbano voltadas à resiliência urbana e adaptação às mudanças climáticas (Vellozo et al., 2022), atestando a viabilidade dos wetlands construídos em maior escala.

Com abordagem semelhante, porém em maior escala, o sistema **Staten Island Bluebelt** deve ser destacado como um dos mais completos da área de soluções baseadas na natureza. Implantado em 1999 no Staten Island, na cidade de Nova York, nos Estados Unidos. O projeto abrange cerca de 16 bacias hidrográficas, totalizando cerca de 40.470.000 m² e integra corredores naturais de drenagem, córregos, rios e as wetlands naturais e construídas com estruturas hidráulicas para manejo de toda a vazão do escoamento pluvial (Nova York, 2019). Essas práticas permitem que tal escoamento seja conduzido, armazenado e tratado de forma descentralizada, promovendo simultaneamente o controle de enchentes, a melhoria das condições dos corpos hídricos e a preservação dos ecossistemas urbanos; perante a limitação das soluções convencionais. A adoção dessa abordagem está diretamente relacionada ao contexto histórico de expansão urbana acelerada em Staten Island, especialmente a partir da segunda metade do século XX, quando o crescimento urbano ocorreu de forma mais rápida que a implantação de sistemas adequados de drenagem e esgotamento sanitário, resultando em recorrentes episódios de alagamentos e degradação da qualidade da água (Gumb et al., 2007; Mehrotra et al., 2010).

O funcionamento do sistema baseia-se na utilização de corredores naturais de drenagem associados a estruturas hidráulicas projetadas para regular o fluxo da água ao longo da bacia hidrográfica. Nesse arranjo, o escoamento superficial é coletado por redes convencionais e direcionado para áreas naturais ou adaptadas, como wetlands construídos, canais restaurados e bacias de retenção, que atuam na dissipação de energia, retenção de sedimentos e armazenamento temporário da água e fitorremediação, utilizando espécies vegetais nativas selecionadas para a remoção biológica de poluentes urbanos, como nitrogênio e fósforo. Esses dispositivos operam de forma integrada, configurando uma rede contínua de drenagem que combina processos naturais e engenharia hidráulica para redução dos impactos do escoamento urbano (Gumb et al., 2007; Mehrotra et al., 2010), conforme ilustrado na Figura 05.



Figura 05: Trecho do sistema Bluebelt.
Fonte: Waterfront Alliance (2015)

Nessa condição, o Bluebelt também se destaca como estratégia de adaptação às mudanças climáticas, demonstrando alta resiliência durante eventos extremos como o Furacão Sandy (2012), contribuindo para a requalificação de áreas sob pressão da urbanização e para a melhoria das condições ambientais e urbanas ao longo de sua área de influência. Destaca-se por sua eficiência econômica em relação às soluções convencionais de drenagem, reduzindo custos de implantação e manutenção, ao mesmo tempo em que fortalece a resiliência urbana e a qualidade de vida da população (Gumb et al., 2007; Mehrotra et al., 2010). Segundo ASLA (2019) a adoção do sistema resultou em economia aproximada de US$80 milhões em comparação à implantação de infraestrutura convencional de esgotamento e drenagem, evidenciando sua efetividade econômica. Nesse sentido, o Bluebelt destaca-se como um modelo de gestão hídrica em larga escala que mostra o potencial da integração entre sistemas naturais e infraestrutura urbana, especialmente em contextos que permitem o planejamento territorial integrado e a valorização de áreas naturais como parte da solução.

Em uma perspectiva igualmente voltada à escala ampliada, com maior ênfase na integração entre processos ecológicos e o desenho urbano, o sistema **Parque Nacional de Mananciais Urbanos de Qunli**, localizado na cidade de Harbin, na China, configura-se como um dos principais exemplos internacionais da integração de wetlands construídos ao planejamento urbano contemporâneo. Fundado em 2010, o parque ocupa uma área aproximada de 342.000 m² e foi desenvolvido em uma região originalmente composta por zonas úmidas naturais inseridas em um contexto de rápida expansão urbana, desempenhando papel estratégico na reorganização ambiental do território (Zhu; Zhang; Zhao, 2020).

O projeto foi concebido a partir dos princípios das chamadas “cidades-esponja”, abordagem que busca restaurar a capacidade natural das cidades de absorver, armazenar e infiltrar a água da chuva, em oposição aos modelos convencionais baseados em drenagem rápida. A estratégia consistiu na criação de um "anel de filtragem" periférico por meio da técnica de corte e aterro (balanço zero de terra), formando uma série de montes e lagoas que funcionam como filtros biológicos por gravidade (Turenscape, 2011). Nesse contexto, o parque atua como um sistema de retenção e regulação hídrica, permitindo o armazenamento temporário das águas pluviais e reduzindo os riscos de alagamentos urbanos, ao mesmo tempo em que favorece processos naturais de filtragem e recarga hídrica (ABRIL, 2025). Estudos comprovam que o sistema possui capacidade de retenção de aproximadamente 500.000 m³ de água por ano, contribuindo para a mitigação de problemas históricos de inundação em uma área urbana de cerca de 3 km² no entorno do parque (IDEASS, 2012; Turenscape, 2011).

O parque apresenta uma configuração espacial que combina áreas alagadas permanentes e sazonais, conectadas por canais e zonas de transição vegetadas, formando um sistema integrado de tratamento natural. A vegetação desempenha papel fundamental nesse processo, sendo composta por vasta variedade de espécies adaptadas a ambientes úmidos, que atuam na retenção de nutrientes, estabilização do solo e suporte à biodiversidade local (Li et al., 2021). Essa diversidade contribui para o equilíbrio ecológico do sistema, além de favorecer a criação de habitats para diferentes espécies, aspecto observado na Figura 06.



Figura 06: Estrutura do wetland urbano no Parque Qunli.
Fonte: Turenscape (2010)

Sob uma perspectiva integrada, o Qunli Stormwater Wetland Park destaca-se pela sua inserção em uma área de zonas úmidas naturais sob pressão do crescimento urbano, o projeto promoveu a reorganização funcional desse sistema, resultando na valorização do entorno e na consolidação de um espaço urbano ambientalmente qualificado (Zhu; Zhang; Zhao, 2020). Além disso, o parque se estrutura como um espaço de uso público qualificado, no qual passarelas elevadas e torres de observação permitem a circulação e contemplação da paisagem sem interferir nos processos ecológicos do núcleo central preservado, favorecendo a educação ambiental e a aproximação da população com a dinâmica natural do sistema (Landezine, 2013). Esse conjunto de estratégias também contribuiu para a valorização imobiliária e o fortalecimento do desenvolvimento urbano do distrito de Qunli, evidenciando impactos positivos nos âmbitos ambiental, social e econômico. Nesse sentido, o Qunli sobressai por demonstrar o papel desses sistemas como elementos estruturantes da paisagem urbana, capazes de articular funções hidrológicas, ecológicas e sociais em larga escala.

No Quadro 01 estão sintetizadas as principais características dos casos analisados, permitindo a comparação entre diferentes sistemas inseridos em contextos distintos. Foram considerados aspectos como localidade, escala de aplicação, área, principal função de contribuição e diferencial em relação à infraestrutura tradicional de cada projeto para identificação de padrões no papel dessa infraestrutura no planejamento urbano e ambiental.

Caso	Local	Escala	Área do sistema	Função principal	Diferencial
Tanner Springs Park	EUA	Pequena	3.600 m²	Drenagem urbana	Requalificação de área urbanizada
BHTEC	Brasil	Micro	12 m²	Tratamento	Solução descentralizada e de baixo custo
Caiara	Brasil	Média	7.000 m²	Drenagem + tratamento	Revitalização socioambiental de área degradada
Piratininga	Brasil	Média	35.290 m²	Drenagem + tratamento	Integração com planejamento urbano e saneamento
Bluebelt	EUA	Grande	40.470.000 m²	Drenagem regional	Redução de custos frente à infraestrutura cinza
Qunli	China	Grande	342.000 m²	Regulação hídrica	Integração entre drenagem e desenho urbano ecológico

Quadro 01: Síntese comparativa dos wetlands analisados.
Fonte: Os autores (2026)

Observa-se que a escala de implementação influencia diretamente na função desempenhada pelo projeto. Em micro e pequena escala, destacam-se como soluções descentralizadas voltadas ao manejo local do escoamento e ao tratamento pontual. Em escala intermediária, passam a assumir funções integradas de drenagem e requalificação ambiental. Já em larga escala, configuram-se como elementos integradores na infraestrutura urbana, atuando na regulação hídrica e no gerenciamento do escoamento ao nível de bacia. Essa diversidade funcional reforça o potencial dos jardins filtrantes como soluções versáteis no planejamento de cidades mais resilientes e sustentáveis. Conforme sintetizado no Quadro 01, observa-se uma progressão da complexidade funcional com o aumento da escala. Reforçando a importância da adequação do tipo de sistema às características e demandas específicas de cada contexto urbano.

Considerações finais

A análise dos estudos de caso selecionados confirma a premissa de que os wetlands construídos transcendem a função paisagística, atuando como infraestruturas adaptáveis cujos benefícios ecológicos e hidrológicos são diretamente modulados pela escala de intervenção. Enquanto as aplicações em microescala resolvem passivos ambientais pontuais e promovem a educação ambiental, os sistemas de macroescala, como os parques lineares, estabelecem-se como componentes estratégicos para a regulação do ciclo hidrológico e a requalificação territorial de bacias hidrográficas urbanas.

Entretanto, para que essas tecnologias sejam plenamente consolidadas no cenário urbano, é imprescindível superar uma visão puramente contemplativa e adotar um rigor técnico operacional contínuo. A eficiência de tratamento e a longevidade dos jardins filtrantes estão intrinsecamente ligadas a planos de manutenção preventivos, com foco especial na gestão da biomassa vegetal e no monitoramento constante da colmatação (entupimento) do meio filtrante. Sem essas diretrizes de engenharia sanitária, corre-se o risco de transformar ativos ambientais promissores em passivos de difícil recuperação. Além disso, em contextos de urbanização densa e eventos climáticos extremos, os wetlands devem ser compreendidos dentro de uma lógica de infraestrutura híbrida, atuando de forma complementar aos sistemas de macrodrenagem da engenharia cinza convencional para otimizar a resiliência sistêmica da cidade.

Conclui-se, portanto, que o sucesso das Soluções Baseadas na Natureza (SbN) depende da transição urgente de relatos de gestão isolados para monitoramentos técnico-científicos padronizados e, acima de tudo, transparentes. Historicamente, a avaliação dessas intervenções tem se apoiado em uma percepção empírica de melhora, baseada em observações visuais da água e redução de odores que, embora positiva, é insuficiente para validar a segurança sanitária e a eficiência de longo prazo. Para romper com a atual escassez de dados técnicos disponíveis, é fundamental que esses laudos sejam disponibilizados em plataformas de acesso público, permitindo que o desempenho do sistema seja auditável pela sociedade e pela comunidade acadêmica. A democratização dessas informações é o principal motor para a replicabilidade da tecnologia, fornecendo subsídios reais para que futuras implementações possam ser aprimoradas com base em evidências mensuráveis. Somente ao converter a gestão em dado público e acessível será possível consolidar os jardins filtrantes não apenas como intervenções estéticas, mas como ativos hídricos seguros e indispensáveis ao planejamento de cidades resilientes.

Referências Bibliográficas

ABRIL, E. **Kongjian Yu e as cidades-esponja: um legado para cidades resilientes**. Disponível em: <https://casacor.abril.com.br/pt-BR/noticias/arquitetura/kongjian-yu-cidades-esponja-legado-cidades-resilientes>.

ARIES – **Agência Recife para Inovação e Estratégia.** Projeto Jardins Filtrantes do Parque do Caiara. Recife, 2023.

ASLA. **Sociedade Americana de Arquitetos Paisagistas**. Wetlands Construídos: Staten Island Bluebelt (Nova York). ASLA, [s.l.], 2019. Disponível em:<https://www.asla.org/focus-areas/water-stormwater/green-infrastructure-resource-guide/gi-resource-guide-constructed-wetlands>. Acesso em: 20 jan. 2026.

BARBOZA, A. C. D.; OLIVEIRA, A. K. B. AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE JARDINS FILTRANTES DO PARQUE ORLA PIRATININGA DIANTE DE CENÁRIOS DE PRECIPITAÇÕES INTENSAS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS. In: **XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2025, Vitória - ES. Anais.

CAF – BANCO DE DESENVOLVIMENTO DA AMÉRICA LATINA. Inaugurado em Niterói o maior projeto de soluções naturais do Brasil. 2023.

ETE Wetlands Modular BHTEC. Disponível em: <https://www.wetlands.com.br/projects-2/ete-wetlands-modular-bhtec>. Acesso em: 2 fev. 2026.

GUMB, Dana et al. O Staten Island Bluebelt: Um estudo de caso sobre gestão de águas pluviais urbanas. In: **Novatech 2007 - 6ª Conferência Internacional sobre Técnicas e Estratégias Sustentáveis para a Gestão de Recursos Hídricos Urbanos**. GRAIE, Lyon, France, 2007.

HERZOG, Cecilia Polacow. **Alternativas baseadas na natureza para cidades resilientes**. Rio de Janeiro: COPRUA/CEPERJ, 2020.

IDEASS. **Qunli Stormwater Park: solução natural para gestão de inundações urbanas**. Roma: IDEASS – Innovation for Development and South-South Cooperation, 2012. Disponível em: http://www.ideassonline.org/public/pdf/QunliStormwaterPark-ENG.pdf

KIM, S. **Infraestrutura verde como estratégia de planejamento urbano sensível à água na era das mudanças climáticas**. p. 851–864, 11 jun. 2015.

LANDEZINE. **Qunli National Urban Wetland by Turenscape**. 2013. Disponível em: https://landezine.com/qunli-national-urban-wetland-by-turenscape/

LI, Qingnan et al. Diversidade de recursos vegetais no Qunli National Urban Wetland Park em Harbin, China. **Revista de Recursos e Ecologia**, v. 12, n. 6, p. 822-828, 2021.

MEHROTRA, S. et al. Manutenção bem-sucedida da infraestrutura verde para gestão de águas pluviais: a cidade de Nova York Staten Island Bluebelt. Em: **Novatech 2010 - 7ª Conferência Internacional sobre Técnicas e Estratégias Sustentáveis para a Gestão de Recursos Hídricos Urbanos**. GRAIE, Lyon, France, 2010. p. 1-8.

NITERÓI. Prefeitura Municipal. Parque Orla Piratininga: Jardins Filtrantes. **Prosustentavel**, Niterói, 2026. Disponível em: https://www.prosustentavel.niteroi.rj.gov.br. Acesso em: 3 abr. 2026.

NOTÍCIAS AMBIENTAIS. Niterói revoluciona o urbanismo sustentável no Brasil com os jardins filtrantes do Parque Orla Piratininga. **Notícias Ambientais**, Rio de Janeiro, 2026.

NUAMAH, L. A. et al. Wetlands construídos, situação atual, progresso e desafios. A necessidade de uma reavaliação operacional crítica para um ecossistema mais limpo e produtivo. A necessidade de uma reavaliação operacional crítica para um ecossistema produtivo mais limpo. **Revista de Produção Mais Limpa**, v. 269, p. 122340, out. 2020.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Água potável.** Drinking-water. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>.

Parque Orla de Piratininga – **Phytorestore**. Disponível em: <https://phytorestore.com.br/projeto/parque-orla-piratininga-pop/>. Acesso em: 3 jan. 2026.

RECIFE. Prefeitura Municipal. Prefeitura do Recife inaugura Jardins Filtrantes no Parque do Caiara. **Prefeitura do Recife**, Recife, 31 mar. 2023. Disponível em: https://www2.recife.pe.gov.br. Acesso em: 3 abr. 2026.

REZENDE, Osvaldo Moura et al. Estudo Hidrológico-Hidrodinâmico para Avaliação do Comportamento de um Sistema de Jardins Filtrantes. **Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica. Ouro Preto/MG**, 2022.

SILVA, Daniele Feitoza et al. Drenagem e manejo de águas pluviais no Brasil: conceitos, gestão e estudos de caso. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 21, n. 2024, 2024.

STEFANAKIS, A. I. O papel dos wetlands construídos como infraestrutura verde para a gestão sustentável da água urbana. **Sustentabilidade**, v. 11, n. 24, p. 6981, 6 dez. 2019.

TRAJANO, M. C. **Jardins filtrantes no Recife completam três anos com redução de 90% da poluição.** Disponível em: <https://jc.uol.com.br/pernambuco/2026/03/30/jardins-filtrantes-no-recife-completam-tres-anos-com-reducao-de-90-da-poluicao.html>. Acesso em: 31 mar. 2026.

TURENSCAPE. **Qunli Stormwater Wetland Park**. Beijing: Turenscape, 2011. Disponível em: https://www.turenscape.com/en/project/detail/435.html

VELLOZO, Leticia Domingos; SANTOS, Leticia Costa de Oliveira; WEINS, Niklas Werner. Disseminação de ideias de Soluções Baseadas na Natureza: uma análise da implementação do Parque Orla de Piratininga, Niterói (RJ). **Revista LABVERDE**, São Paulo, Brasil, v. 12, n. 1, p. 100–128, 2022.

ZHU, Xun; ZHANG, Yaqian; ZHAO, Wei. Diferenças na aquisição de informações ambientais em áreas verdes urbanas — um estudo de caso do Parque Nacional de Zonas Úmidas de Qunli, em Harbin, China. Sustainability , v. 12, n. 19, p. 8128, 2020.

MAPEAMENTO DE METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO PARA INCÊNDIOS EM CONTEXTO URBANO – PROTOCOLO DE REVISÃO DE ESCOPO

1 Arthur Jorge de Veras da Silva, 2 Otto Corrêa Rotunno Filho, 3 Paulo Gustavo Von Kruger, 4 Cristina Calmeiro dos Santos, 5 Erika Esteves Lasmar

1 Doutorando Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, e-mail: arthurdeveras@hotmail.com; 2 Professor Doutor Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, e-mail: otto@coc.ufrj.br; 3 Professor Doutor Escola de Arquitetura – UFMG, e-mail: paulovonkruger@gmail.com; 4 Professora Doutora Instituto Politécnico de Castelo Branco – Portugal, e-mail: ccalmeiro@ipcb.pt; 5 Doutora Escola de Arquitetura – UFMG, e-mail: erika_lasmar@yahoo.com.br

Palavras-chave: Incêndios urbanos; Protocolo de revisão de escopo; análise de risco

Resumo

A crescente complexidade dos centros urbanos, associada ao adensamento populacional, à verticalização das edificações e à diversidade de padrões construtivos, tem ampliado a vulnerabilidade das cidades à ocorrência de incêndios. Nesse contexto, a análise de risco de incêndios urbanos assume papel estratégico no planejamento territorial e na gestão de desastres. Entretanto, observa-se na literatura uma ampla diversidade de metodologias aplicadas a esse tipo de análise, frequentemente desenvolvidas de forma fragmentada e sem padronização de critérios, o que dificulta a comparabilidade entre estudos e a consolidação de um referencial técnico consistente.

Diante dessa lacuna, este trabalho apresenta um protocolo de revisão de escopo voltado ao mapeamento sistemático das metodologias de análise de risco de incêndios em contextos urbanos. O protocolo é estruturado com base nas diretrizes do *Joanna Briggs Institute* e do PRISMA-ScR, assegurando rigor, transparência e reprodutibilidade. A pesquisa é orientada pela estratégia PCC (Participante, Conceito e Contexto), contemplando incêndios em edificações urbanas, metodologias de análise de risco e o contexto urbano.

O protocolo estabelece critérios de elegibilidade, estratégias de busca, bases de dados e procedimentos de seleção e extração de dados conduzidos por revisores independentes. As buscas abrangem bases científicas consolidadas e literatura cinzenta, considerando publicações entre 2021 e 2025. Adicionalmente, prevê-se a realização de síntese descritiva e análise bibliométrica, com o objetivo de identificar padrões, tendências e lacunas na produção científica.

Como principal contribuição, o estudo propõe uma estrutura metodológica sistematizada que permite organizar e comparar diferentes abordagens de análise de risco de incêndios urbanos, superando a fragmentação observada na literatura. Espera-se que sua aplicação contribua para o avanço do campo, subsidiando o desenvolvimento de modelos mais integrados e o aprimoramento de políticas públicas voltadas à redução da vulnerabilidade urbana e ao aumento da resiliência das cidades.

Introdução

A avaliação de risco de incêndio urbano é cada vez mais reconhecida como uma componente vital da segurança e planejamento urbano, uma vez que as cidades enfrentam um rápido e desordenado crescimento. A intensificação dos processos de urbanização e a crescente complexidade na formação dos centros urbanos, caracterizados pelo destacado adensamento populacional, pela verticalização das edificações, pela coexistência de estruturas históricas e novas e pelo uso de materiais combustíveis, ampliam, de forma significativa, a vulnerabilidade das cidades a incêndios (THAKARE; TAJNE, 2024). Devido ao tratamento multifacetado que as questões urbanas estão a requerer, sobressaem as tecnologias de informação e de comunicação, que têm sido utilizadas há muito tempo para auxiliar cientistas e profissionais na gestão das infraestruturas urbanas, com vistas a melhorar a eficiência e a eficácia de muitos procedimentos de trabalho em órgãos governamentais (TAO, 2013).

Os eventos de incêndio urbano, além de gerar vítimas fatais, perdas de bens patrimoniais, impactos no trânsito, entre outras consequências, demandam estratégias eficazes de preparação, mitigação e prevenção. Custos com a recuperação ou com a reconstrução de edificações incendiadas, somados a despesas hospitalares de vítimas, produzem significativos prejuízos sociais.

Nos Estados Unidos, em 2023, foram registrados aproximadamente 470 mil incêndios em edificações, resultando em 3.070 mortes de civis, 11.790 feridos e US$ 14,7 bilhões em prejuízos materiais diretos (HALL, 2024). No mesmo ano, na Inglaterra, os serviços de bombeiros atenderam 142.276 ocorrências de incêndios em edificações, com 246 mortes associadas a esses eventos (OCHOA, 2024).

O risco de incêndio pode ser estudado, por exemplo, no nível do indivíduo, do agregado familiar, de um edifício ou no nível da vizinhança. Da mesma forma, o risco de incêndio pode ser conceituado em termos de risco para pessoas ou propriedades. Além disso, pode ser quantificado por perdas financeiras, pessoas feridas e óbitos (JENNINGS, 2013).

Observa-se que as metodologias usualmente empregadas para análise de risco de incêndios urbanos são diversas, contidas em diferentes áreas do conhecimento, com aplicações que se distinguem segundo a escolha e a seleção de distintos parâmetros de modelagem associados aos correspondentes eventos, bem como a diversidade quanto a escalas de análise na padronização de indicadores de risco e critérios de aceitabilidade. A pluralidade em termos de metodologias de análise, aliada à ausência de sistematização de procedimentos e limitação na adoção de protocolos, gera fragilidades na pontuação comparativa

de abordagens e dificulta a construção e a consolidação de um referencial técnico adequado para subsidiar a tomada de decisão mais efetiva e apropriada em cada caso de sinistro (NFPA, 2018).

Além dos aspectos técnicos, a análise de risco de incêndio em contexto urbano envolve uma dimensão social, incluindo aspectos culturais relevantes, especialmente em cidades que concentram patrimônio edificado de valor histórico. A vulnerabilidade associada ao patrimônio cultural, sua exposição a uma série de riscos naturais e antrópicos, ameaça sua existência. Todos os anos, desastres levam à perda de inúmeros bens do patrimônio cultural e causam danos significativos, o que reforça a necessidade de concepção de metodologias de avaliação integradas, que articulem segurança, preservação e planejamento territorial (XAVIER; CHIARA, 2022).

Os modelos de análise de risco de incêndios urbanos podem ser classificados, de forma geral, em abordagens qualitativas, quantitativas e semi-quantitativas, variando conforme o nível de complexidade, disponibilidade de dados e escala de aplicação. Modelos quantitativos, como os baseados em regressão múltipla, têm sido amplamente utilizados para identificar relações entre variáveis socioeconômicas, demográficas e físicas e a ocorrência de incêndios, permitindo estimar a contribuição relativa de diferentes fatores de risco (JENNINGS, 2013; HU et al., 2019). Paralelamente, abordagens apoiadas em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) têm possibilitado avanços significativos na análise espacial do risco, permitindo a identificação de padrões territoriais, zonas críticas e a integração de múltiplas camadas de informação, como densidade populacional, uso do solo e infraestrutura urbana (WEBER; WOLLMANN, 2016; ZHANG et al., 2020). Essas metodologias têm sido especialmente relevantes em estudos que buscam compreender a distribuição espacial dos incêndios e subsidiar o planejamento urbano orientado à redução de riscos.

Por outro lado, modelos mais integrados têm buscado incorporar dimensões sociais, econômicas e institucionais na avaliação do risco, reconhecendo que a vulnerabilidade urbana vai além dos aspectos físicos das edificações. Estudos como o de Rahmawati et al. (2015) propõem estruturas que combinam variáveis de vulnerabilidade, exposição e capacidade de resposta, incluindo fatores como educação para desastres, acesso a equipamentos de combate a incêndio e proximidade de serviços de emergência. Além disso, análises em escala local evidenciam que condições urbanas precárias, como infraestrutura deficiente e instalações elétricas inadequadas, estão fortemente associadas à maior incidência de incêndios (WEBER; WOLLMANN, 2016; MIGUEL; CAUDURO, 2018). Nesse sentido, observa-se uma tendência crescente na literatura em direção ao desenvolvimento de modelos mais abrangentes e interdisciplinares, capazes de integrar diferentes dimensões do risco e fornecer suporte mais eficaz à tomada de decisão em contextos urbanos.

Diante desse cenário, torna-se fundamental desenvolver instrumentos de sistematização sobre o conhecimento existente, ao estruturar uma plataforma para as avaliações de risco de incêndio em áreas urbanas. O Protocolo de Revisão de Escopo propõe o mapeamento das metodologias de análise de risco aplicadas a contextos urbanos, com base nas diretrizes metodológicas propostas *pelo Joanna Briggs Institute* e pelo PRISMA-ScR (PETERS et al., 2020; TRICCO et al., 2018).

Face ao contexto exposto, o presente estudo concentrou esforços para cumprir o objetivo de mapear procedimentos de modelagem de incêndios urbanos, com foco no planejamento urbano e regional publicados, mediante a opção de análise dedicada ao período mais recente situado entre 2021 e 2025, buscando-se identificar os principais centros de produção de conhecimento e autores sobre o tema, bem como discriminando os diferentes enfoques adotados, a fim de contribuir para o aprimoramento de processos de diagnóstico, planejamento, previsão e operação no combate a incêndios em áreas urbanizadas, considerando-se fatores ambientais e climáticos, somando-se ainda estimativas de perdas humanas e materiais.

Assim, o protocolo de revisão de escopo concebido alinha-se às premissas da gestão de risco baseada em evidências (ISO, 2018) e às diretrizes do Marco de Sendai para Redução de Risco de Desastres 2015–2030 (UNDRR, 2017), ao propor uma sistematização de levantamentos, triagens e análise de autores que possam incentivar e fortalecer a cultura de prevenção e a capacidade de resposta frente a incêndios urbanos (ISO, 2018).

Materiais e métodos

As metodologias clássicas de avaliação de risco de incêndio concentram-se predominantemente na análise individual de edificações, especialmente construções recentes, não havendo ainda um método amplamente consolidado para avaliações em larga escala urbana. Entre os principais modelos tradicionais, destaca-se o método de Gretener, amplamente utilizado por seguradoras, baseado na análise sistemática dos fatores de risco e das medidas de segurança existentes na edificação. Derivados ou complementares a essa abordagem, o método F.R.A.M.E. avalia a relevância percentual de parâmetros como materiais, sistemas de detecção e compartimentação; o método F.R.I.M., inspirado no modelo de Gretener, incorpora aspectos relacionados à ocupação e segurança de pessoas e bens, sendo aplicado com frequência em edificações de madeira; e o método A.R.I.C.A. foi desenvolvido para contextos históricos, permitindo adaptações às limitações construtivas de centros urbanos antigos. De modo geral, esses métodos refletem uma abordagem centrada no nível da edificação, com ênfase em características físicas e sistemas de proteção, evidenciando a lacuna existente na análise integrada do risco em escala urbana (BRANDÃO, 2012).

A elaboração do protocolo de revisão de escopo segue as diretrizes metodológicas propostas pelo *Joanna Briggs Institute* e pelo PRISMA-ScR. O processo inclui a definição do protocolo e do registro, critérios de elegibilidade, seleção das fontes de evidência, extração e síntese dos dados. A abordagem visa assegurar rigor, transparência e reprodutibilidade na identificação e caracterização das metodologias de análise de risco aplicadas a incêndios urbanos, possibilitando uma compreensão abrangente e integrada das diferentes abordagens utilizadas na literatura científica (PETERS et al., 2020; TRICCO et al., 2018).

Protocolo e registro

Foi realizada uma pesquisa prévia na plataforma OSF (*Open Science Framework*), não tendo sido encontrados protocolos semelhantes. Observa-se ainda que, depois de finalizado, o protocolo estabelecido é, então, submetido para registro nessa base.

Critérios de elegibilidade

Conforme procedimentos metodológicos propostos pelo JBI, a revisão será estruturada segundo a estratégia PCC (Participante, Conceito e Contexto), adotando-se a seguinte associação: o "Participante" corresponde a incêndios, o "Conceito" refere-se a modelos de análise de risco, e o "Contexto" abrange áreas urbanas. Essa estrutura metodológica permite organizar a busca e a seleção dos estudos de forma sistemática, garantindo que a revisão contemple, de maneira abrangente, as diferentes abordagens sobre o tema dos incêndios em ambientes urbanos (PETERS et al., 2020; TRICCO et al., 2018).

Os critérios de inclusão estabelecem que o Participante abrange eventos de incêndios em edificações; o Conceito refere-se a modelos, metodologias e técnicas de análise de risco; e o Contexto corresponde a eventos ocorridos em áreas urbanas. São incluídos estudos desenvolvidos em quaisquer cenários urbanos que abordem incêndios estruturais, publicados em português, inglês ou espanhol. O recorte temporal adotado, compreendendo os últimos cinco anos (2021-2025), justifica-se pela rápida evolução das tecnologias de modelagem espacial, aprimoramento do uso de Big Data, inteligência artificial e modelagem avançada em Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Adicionalmente, são excluídos trabalhos que tratem de incêndios florestais ou de ocorrências na interface urbano-rural, assim como os incêndios urbanos em veículos, por não se enquadrarem no escopo definido.

Dessa forma, a revisão busca responder à seguinte pergunta de pesquisa principal: quais modelos de análise de risco de incêndio são utilizados em contextos urbanos? Além disso, explora-se uma pergunta secundária: quais modelos de análise de risco de incêndio incorporam fatores socioeconômicos e de planejamento urbano? Essas questões orientaram a coleta e a análise dos dados, permitindo identificar lacunas de conhecimento e oportunidades para o aprimoramento das metodologias de avaliação de risco em incêndios urbanos.

Fontes de informação

A busca das evidências foi conduzida em bases de dados científicos reconhecidos, selecionados por sua abrangência e relevância para o tema de incêndios urbanos. Foram consultadas as plataformas de bases científicas internacionais, nomeadamente Web of Science, Scopus, ScienceDirect, SciELO, além de fontes de literatura cinzenta, como Google Scholar e ProQuest, a fim de incluir dissertações, teses e relatórios técnicos.

Estratégia de busca

Para a estratégia de busca, foram utilizados os operadores booleanos e os caracteres especiais, de modo a tornar as buscas mais precisas e eficientes em bases de dados. Os operadores AND, OR e NOT ajudam a combinar ou limitar termos, a saber: (i) AND localiza registros que contenham todos os termos; (ii) OR amplia a busca incluindo qualquer um deles; e (iii) NOT exclui termos indesejados. Entre os caracteres especiais, o asterisco (*) permite buscar variações de uma palavra (como analys para analysis ou analytical), e as aspas (“ ”) garantem que a busca seja feita por uma expressão exata. O uso adequado desses recursos melhora a qualidade e a reprodutibilidade das buscas científicas.

A estratégia de busca foi inicialmente elaborada para a rede Web of Science, requerendo ser adaptada para cada base de dados alternativa selecionada. Os resultados das buscas são exportados para um gerenciador de referências bibliográficas operante na forma on-line (Endnote). A estratégia de busca empregada foi especificada conforme a Tabela 1.

Busca	Palavras-chave	Número de Registros encontrados
#1	("fire")	1.104.615
#2	("analys*" OR "risk" OR "model" OR "index")	73.810.904
#3	("urban*" OR "cit*") NOT ("forest" OR "wild*" OR "wood*")	4.961.195
#1 AND #2 AND #3	("fire") AND ("analys*" OR "risk" OR "model" OR "index") AND ("urban*" OR "cit*") NOT ("forest" OR "wild*" OR "wood*")	3.416

Tabela 1: Estratégia de busca - Web of Science.

Seleção das fontes de evidência

A seleção das fontes de evidência é realizada em duas etapas complementares. Na primeira, dois revisores independentes fazem a triagem dos títulos e resumos identificados nas bases de dados, aplicando os critérios de elegibilidade previamente definidos. Na segunda etapa, os textos completos dos estudos potencialmente relevantes são analisados em detalhe, assegurando que apenas aqueles alinhados aos objetivos da revisão sejam incluídos. Eventuais divergências entre os revisores são resolvidas por consenso, e, se necessário, com a participação de um terceiro avaliador.

Todo o processo é conduzido com o auxílio da plataforma Rayyan®, que permite o gerenciamento colaborativo das referências, facilita a detecção de duplicidades e aprimora a transparência na tomada de decisão.

As razões para exclusão dos estudos na etapa de texto completo serão registradas e apresentadas no fluxograma PRISMA-ScR. Essa metodologia assegura reprodutibilidade e rigor na construção do corpo de evidências que fundamenta a revisão de escopo.

Avaliação crítica

A etapa de avaliação crítica possui o intuito de compreender a qualidade metodológica e a consistência das evidências encontradas. São observados aspectos como a clareza dos objetivos, a adequação dos métodos, a coerência entre resultados e conclusões, bem como a relevância dos estudos para o contexto urbano dos incêndios.

A análise é realizada por dois revisores de forma independente, com base em uma adaptação do instrumento do *Joanna Briggs Institute* (PETERS et al., 2020). Os resultados não têm caráter excludente, mas servem para contextualizar a síntese final, identificar possíveis vieses e indicar lacunas ou fragilidades metodológicas, contribuindo para o aprimoramento das futuras pesquisas sobre análise de risco de incêndios urbanos.

Extração de dados

A etapa de extração dos dados é conduzida de forma sistemática, utilizando um formulário padronizado elaborado pelos autores, com base no modelo proposto pelo *Joanna Briggs Institute* (PETERS et al., 2020). O formulário foi adaptado para atender aos objetivos desta revisão, contemplando informações bibliográficas, metodológicas e conceituais relevantes ao tema dos incêndios urbanos. (Tabela 2).

Será adotado um procedimento padronizado para tratar dados ausentes nos estudos incluídos. As lacunas identificadas durante a extração serão registradas, e, quando envolverem informações essenciais, os autores poderão ser contatados. Caso não haja resposta, os dados serão classificados como "não informado" e incluídos na síntese narrativa.

O processo é realizado por dois revisores de forma independente, a fim de garantir a consistência e reduzir possíveis vieses. As divergências são resolvidas por consenso e, caso necessário, com a participação de um terceiro revisor. Antes da aplicação definitiva, testa-se o formulário em uma etapa piloto com cinco (5) dos estudos incluídos, permitindo ajustes e refinamentos nas categorias de extração. Relata-se qualquer modificação no formulário na versão final da revisão.

As informações são organizadas em planilhas do Microsoft Excel®, constituindo uma base de dados estruturada para análise descritiva e comparativa. O procedimento assegura a rastreabilidade das informações e o alinhamento da extração com os objetivos da revisão, permitindo a identificação de padrões, lacunas e tendências nas metodologias de análise de risco aplicadas a incêndios urbanos.

Dado	Detalhe / Exemplo
Informações gerais	
Título	Análise de risco de incêndios urbanos
Autor(es)	Nome e sobrenome dos autores
Periódico	Nome da revista
Ano	Ano da publicação
País ou cidade de origem	País ou cidade onde o estudo foi realizado
Instituição(ões)	Instituição do autor responsável pela publicação
Tipo de publicação	Tese, Dissertação ou artigo
Participantes - incêndios	
Tipo	Residencial, comercial, hospitalar etc.
Tamanho da amostra de incêndios	Quantidade de incêndios analisadas
Periodicidade da amostra	Descrever a sazonalidade de ocorrência dos incêndios
Conceito – modelos de análise de risco	
Técnica ou metodologia	Descrever as metodologias empregadas
Fatores socioeconômicos	Renda per capta, idade média da população etc.
Fatores urbanísticos	Idade média das edificações, densidade populacional
Outros fatores	Descrever os fatores utilizados nos modelos
Contexto – áreas urbanas	
Número de habitantes	Indicar a quantidade de habitantes da área de estudo
Medição da área urbana	Indicar área analisada em km²
Características do estudo	
Principais resultados	Descrever o resultado principal do estudo
Recomendações	Descrever as principais recomendações do estudo
Limitações	Descrever as limitações da pesquisa

Tabela 2: Formulário de extração de dados.

Síntese dos resultados

A síntese dos resultados é realizada de forma descritiva, buscando integrar as informações extraídas dos estudos incluídos para identificar padrões, tendências e lacunas nas metodologias de análise de risco de incêndios urbanos em edificações. Os dados coletados são organizados em tabelas e gráficos que evidenciem a distribuição temporal, geográfica e temática das pesquisas, bem como as abordagens conceituais e técnicas empregadas. Essa sistematização permite visualizar a diversidade metodológica e a evolução das práticas de modelagem de risco no contexto urbano.

Além da apresentação tabular e gráfica, elabora-se uma análise narrativa interpretativa, articulando os principais achados com os objetivos da revisão e com as diretrizes do *Joanna Briggs Institute* (PETERS et al., 2020). Essa abordagem possibilita compreender como os diferentes modelos de análise de risco dialogam com fatores socioeconômicos, urbanísticos e ambientais, contribuindo para o desenvolvimento de políticas e estratégias mais eficazes de prevenção e mitigação de incêndios em áreas urbanizadas.

Resultados

A busca preliminar conduzida na base *Web of Science*, mediante a aplicação da *string* de busca estruturada, retornou um total inicial de 3.416 registros. Este volume expressivo de publicações evidencia a crescente relevância global do tema e a necessidade urgente de sistematização das abordagens metodológicas.

Análise bibliométrica

A análise bibliométrica será realizada como etapa complementar à síntese descritiva, utilizando o software VOSviewer para mapear redes de coautoria, cocitação e co-ocorrência de termos relacionados às metodologias de análise de risco de incêndios urbanos. Essa abordagem permitirá identificar autores influentes, agrupamentos temáticos, países e instituições com maior produção científica, bem como tendências emergentes no campo. Os resultados serão apresentados por meio de mapas visuais de clusters, contribuindo para uma compreensão estruturada do panorama científico e para a identificação de lacunas e oportunidades de pesquisa.

Fluxograma PRISMA-ScR

O processo de seleção dos estudos encontra-se documentado por meio de um fluxograma elaborado conforme as diretrizes do PRISMA-ScR. Esse instrumento permite descrever, de forma transparente, todas as etapas da revisão, desde a identificação inicial dos registros nas bases de dados até a inclusão final dos estudos elegíveis. O fluxograma explicita o modelo a ser empregado, identificando o número de registros identificados, os duplicados removidos, os estudos triados, avaliados em texto completo e os motivos para exclusão em cada fase (Figura 1).

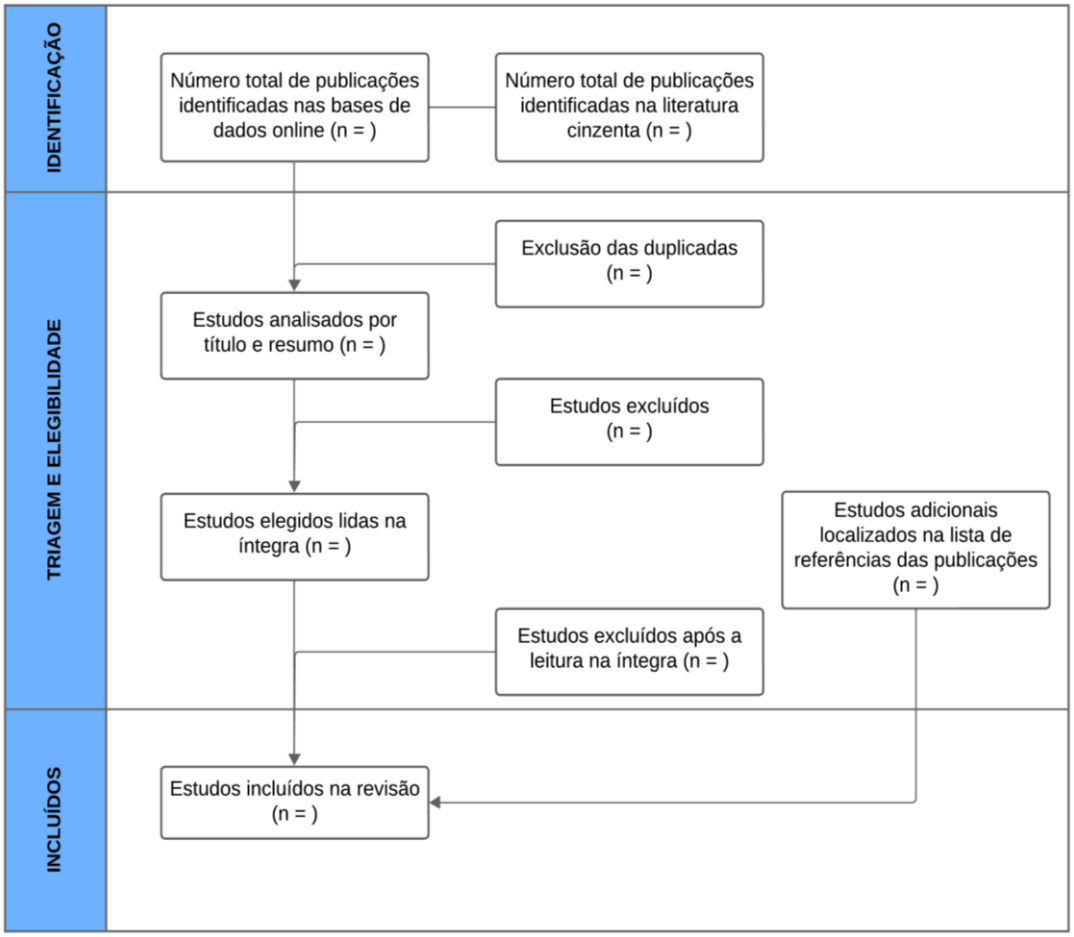


Figura 1: Formulário de extração de dados.
Fonte: Adaptado de TRICCO et al., (2018)

Discussão

A diversidade de modelos identificados deve evidenciar diferentes enfoques quanto à escala de aplicação, parâmetros avaliados e integração entre aspectos físicos, sociais e ambientais, permitindo compreender os avanços e limitações das práticas atuais.

Espera-se que a análise dos estudos revele a necessidade de maior integração interdisciplinar e de modelos que considerem fatores socioeconômicos e urbanísticos nos processos de avaliação de risco. Dessa forma, os achados podem orientar o aprimoramento das metodologias existentes e fomentar o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de prevenção e mitigação de incêndios urbanos, fortalecendo políticas públicas e ações de planejamento resiliente.

Nesse contexto, a revisão de escopo se apresenta como uma abordagem metodológica adequada para organizar e sistematizar esse campo de conhecimento, permitindo mapear diferentes tipos de modelos, variáveis e escalas de análise empregados. Ao contrário de revisões sistemáticas tradicionais, a revisão de escopo possibilita a inclusão de estudos com diferentes delineamentos e níveis de evidência, favorecendo uma visão ampla das abordagens existentes e a identificação de lacunas de pesquisa. Adicionalmente, a aplicação de técnicas complementares, como análise bibliométrica, amplia o potencial da revisão ao permitir a identificação de padrões de produção científica, redes de colaboração e tendências emergentes. Dessa forma, o protocolo proposto não apenas contribui para a estruturação do conhecimento sobre risco de incêndios urbanos, mas também estabelece uma base metodológica consistente para o desenvolvimento de estudos futuros mais integrados e comparáveis.

Considerações finais

Este estudo propõe um protocolo de revisão de escopo voltado ao mapeamento das metodologias de análise de risco de incêndios urbanos, contribuindo para a sistematização do conhecimento e para a identificação de lacunas na literatura científica. Ao integrar diferentes abordagens e áreas do conhecimento, a pesquisa busca fortalecer a base conceitual necessária ao desenvolvimento de modelos mais abrangentes e eficazes.

Os resultados oriundos desta proposição permitirão subsidiar o desenvolvimento de modelos mais abrangentes e integrados, capazes de incorporar fatores socioeconômicos, urbanísticos e ambientais nos processos de avaliação de risco. Assim, a revisão pretende oferecer subsídios técnicos e científicos que orientem políticas públicas, práticas de gestão urbana e pesquisas futuras voltadas à redução da vulnerabilidade das cidades frente aos incêndios.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro (CBMERJ), à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e à Universidade de Coimbra pelo apoio institucional e acadêmico ao desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

BRANDÃO, M. R. A Avaliação da Suscetibilidade dos Incêndios Urbanos. O caso de estudo da Avenida Sousa Cruz em Santo Tirso. Universidade do Porto. 2012, Porto.

FRANÇA, C. D. V. Riscos de incêndios: diagnóstico do município de São José de Ribamar – MA. 2018. 112 f. Dissertação – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2018.

HALL, J. R. Fire loss in the United States during 2023. Quincy, MA: National Fire Protection Association (NFPA), 2024.

HU, J.; SHU, X.; XIE, S.; TANG, S.; WU, J.; DENG, B. Socioeconomic determinants of urban fire risk: a city-wide analysis of 283 Chinese cities from 2013 to 2016. Fire Safety Journal, 2019.

ISO. International Organization for Standardization 31000:2018: Risk management – guidelines. Geneva: ISO, 2018.

JENNINGS, C. R. Social and economic characteristics as determinants of residential fire risk in urban neighborhoods: a review of the literature. Fire Safety Journal, 2013.

MIGUEL, R. V.; CAUDURO, F. Análise da ocorrência de incêndios entre 2015 e 2017 na cidade de Criciúma – SC. 2018. 16 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2018.

NFPA. National Fire Protection Association 551: Guide for the evaluation of fire risk assessments. Quincy, MA: NFPA, 2018.

OCHOA, M. Fire and rescue incident statistics: England, year ending December 2023. Londres: Ministry of Housing, Communities & Local Government, 2024.

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, v. 372, n. 71, 2021. DOI: https://doi.org/10.1136/bmj.n71

PETERS, M. D. J. et al. Chapter 11: Scoping reviews. In: JBI. JBI manual for evidence synthesis. 2020. DOI: https://doi.org/10.46658/JBIMES-20-12

RAHMAWATI, D.; PAMUNGKAS, A.; AULIA, B. U.; LARASATI, K. D.; RAHADYAN, G. A.; DITO, A. H. Participatory mapping for urban fire risk reduction in high-density urban settlement. 2015.

TAO, W. Interdisciplinary urban GIS for smart cities: advancements and opportunities. Geo-Spatial Information Science, v. 16, n. 1, p. 25–34, 2013. DOI: https://doi.org/10.1080/10095020.2013.774108

THAKARE, K. V.; TAJNE, K. M. A comprehensive review of geographic information systems (GIS)-based methodologies for urban fire risk assessment. Cureus Journal of Engineering, v. 2, p. es44388-024-02916-y, 2024. DOI: https://doi.org/10.7759/s44388-024-02916-y

TRICCO, A. C. et al. PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): checklist and explanation. Annals of Internal Medicine, v. 169, n. 7, p. 467–473, 2018.

UNDRR. Terminology on disaster risk reduction. Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2017.

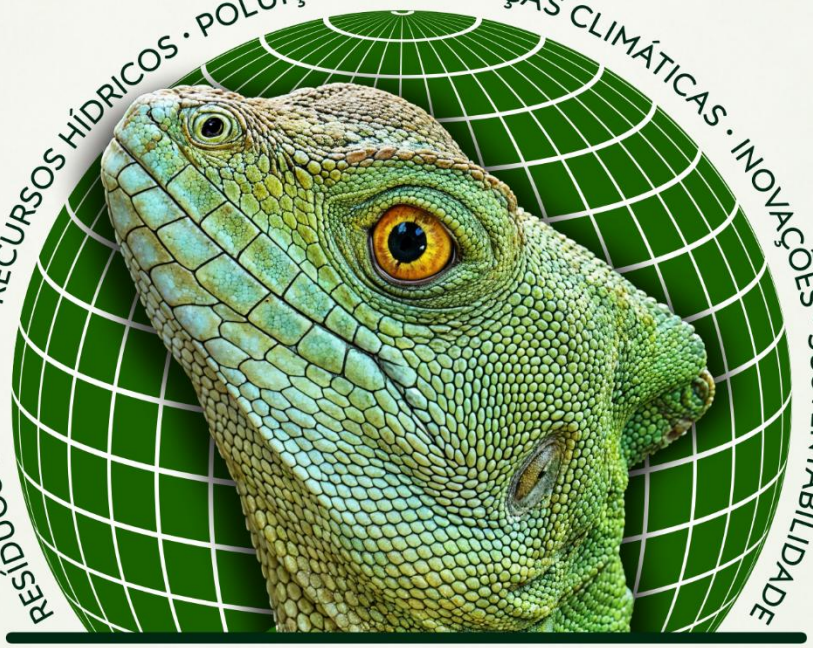
WEBER, A. A.; WOLLMANN, C. A. Mapeamento dos incêndios residenciais na área urbana de Santa Maria, RS, Brasil utilizando o estimador de densidade Kernel. Revista Investigaciones Geográficas, Santiago, p. 49–60, 2016.

XAVIER, R.; CHIARA, B. Risk protection for cultural heritage and historic centers: current knowledge and further research needs. International Journal of Disaster Risk Reduction, v. 67, p. 102652, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102652

ZHANG, X.; YAO, J.; SILA-NOWICKA, K.; JIN, Y. Urban fire dynamics and its association with urban growth: evidence from Nanjing, China. ISPRS International Journal of Geo-Information, v. 9, n. 4, p. 218, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/ijgi9040218

ÁREA TEMÁTICA 15

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E SUSTENTABILIDADE



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E SUSTENTABILIDADE DE ESTRUTURAS DE SOMBREAMENTO PARA ÁREAS DE PASTEJO DE GALINHAS POEDEIRAS EM SISTEMA FREE-RANGE

1 Giulia Correa Sassi, 2 Tadayuki Yanagi Junior, 3 Jaqueline de Oliveira Castro, 4 Edisson José Fassani, 5 Alessandro Torres Campos, 6 João Flávio de Paulo Costa Santos, 7 Ilton Vaz Neto, 8 Maria Arial Félix da Silva

1 UFLA, e-mail: giulia.sassi2@estudante.ufla.br; 2 UFLA, e-mail: yanagi@ufla.br; 3 UFLA, e-mail: jaqueline.castro@ufla.br; 4 UFLA, e-mail: fassani@ufla.br; 5 UFLA, e-mail: campos@ufla.br; 6 UFLA, e-mail: joao.santos11@estudante.ufla.br; 7 UFLA, e-mail: ilton.neto@estudante.ufla.br; 8 UFLA, e-mail: maria.silva29@estudante.ufla.br

Palavras-chave: Bem-estar animal; Sustentabilidade agropecuária; Inteligência Artificial.

Resumo

A transição para sistemas de produção menos intensivos na avicultura de postura, como o free-range, enfrenta o desafio crescente das mudanças climáticas e do estresse térmico em regiões tropicais. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho térmico e a sustentabilidade de sete materiais de cobertura utilizados como estruturas de sombreamento artificial para galinhas poedeiras em áreas de pastejo. A fundamentação do estudo compreendeu uma revisão sistemática e bibliométrica da literatura, que mapeou as tendências globais sobre conforto térmico animal e identificou lacunas no uso de materiais sustentáveis e modelagem preditiva. A pesquisa experimental, desenvolvida na Universidade Federal de Lavras (UFLA), utilizou protótipos em escala reduzida equipados com coberturas de alumínio, tela de polietileno 70%, telhado verde, madeira roliça tratada, bambu, telha ecológica e fibrocimento com subcobertura de material reciclado (tipo Tetra Pak®). A metodologia integrou a coleta de dados microclimáticos contínuos, caracterização morfológica dos materiais via Microscopia Eletrônica de Varredura e uma análise avançada de balanço de energia utilizando Inteligência Artificial informada pela física. Os resultados demonstraram que o fibrocimento com subcobertura reciclada e o telhado verde apresentaram a maior eficiência na mitigação da carga térmica de radiação. Enquanto o alumínio e a tela de polietileno mostraram-se ineficazes devido à alta condutividade e porosidade, materiais biogênicos como o bambu e a madeira roliça destacaram-se pela baixa energia incorporada (8,0 a 10,0 MJ/m²). O modelo de Inteligência Artificial validou a correlação entre o ambiente térmico e a produtividade ($R^2 = 0,98$), evidenciando que a escolha estratégica de materiais de cobertura, fundamentada na triagem bibliográfica e nos dados experimentais, é fundamental para a viabilidade econômica, a proteção do investimento em nutrição, que representa 80,26% da energia do sistema, e a garantia do bem-estar animal em climas em transformação.

Introdução

O agronegócio global atravessa um momento de redefinição estratégica, onde a sustentabilidade deixou de ser um conceito acessório para se tornar o eixo central de competitividade e aceitação de mercado. No cenário brasileiro, a transição para sistemas de produção menos intensivos na avicultura de postura, como o sistema free-range (ou sistema caipira), é impulsionada por uma combinação de pressões regulatórias, exigências de certificações internacionais de bem-estar animal e uma mudança profunda no perfil do consumidor, que busca alimentos com maior valor ético e menor impacto ambiental. No entanto, a viabilidade desses sistemas enfrenta um desafio crescente: as mudanças climáticas globais. O aumento na frequência e na intensidade das ondas de calor em regiões tropicais e subtropicais impõe condições extremas que testam os limites fisiológicos das aves e a resiliência financeira dos produtores rurais.

Nesse contexto, a sustentabilidade deve ser compreendida de forma multidimensional. Sob o pilar econômico, ela depende da manutenção de índices produtivos estáveis; sob o pilar social, foca no bem-estar animal; e sob o pilar ambiental, exige a redução da pegada de carbono e o uso de materiais com baixa energia incorporada. No sistema free-range, o bem-estar animal é fundamentado no acesso ao ambiente externo (piquetes), permitindo que a ave expresse comportamentos naturais como o pastejo e o banho de areia. Entretanto, conforme discutido por Baêta e Souza (2010), galinhas poedeiras são animais homeotérmicos com uma zona de termoneutralidade estreita. Sem a proteção adequada contra a radiação solar direta, o sistema que deveria promover o bem-estar acaba por induzir o estresse térmico, o que resulta em queda na taxa de postura, ovos com cascas frágeis e aumento da mortalidade.

Para fundamentar tecnicamente as lacunas existentes entre a teoria e a prática da ambiência avícola, este estudo realizou uma revisão sistemática e bibliométrica da literatura. A análise bibliométrica permitiu mapear o panorama científico global, identificando que, embora o estresse térmico seja um tema consolidado, há uma escassez de estudos voltados especificamente para a eficiência energética de coberturas em áreas externas de pastejo. A triagem sistemática evidenciou que a literatura atual começa a convergir para o uso de materiais de economia circular e infraestruturas verdes, porém, a validação desses materiais por meio de modelos matemáticos complexos ainda é incipiente (SASSI, 2025).

A integração dessas revisões ao corpo deste trabalho justifica a necessidade de uma abordagem que una o balanço térmico tradicional à inovação tecnológica. A revisão sistemática serviu como base para a seleção criteriosa dos materiais avaliados, garantindo que a pesquisa não apenas respondesse a uma demanda prática do produtor, mas também preenchesse o vácuo científico identificado nas bases de dados internacionais sobre o uso de materiais biogênicos e reciclados na avicultura de precisão.

Para mitigar os efeitos do clima, a engenharia biosistêmica recorre ao estudo do balanço de energia. A análise térmica das estruturas de sombreamento em piquetes busca quantificar como a energia solar incidente é refletida, absorvida ou transmitida para o corpo das aves. Materiais de cobertura com alta resistência térmica e alto albedo são essenciais para reduzir a carga térmica de radiação, garantindo que o calor acumulado no microclima sob a estrutura não ultrapasse os limites biológicos. Este trabalho propõe que a análise tradicional do balanço de energia seja potencializada pelo uso da Inteligência Artificial. A aplicação de redes neurais informadas pela física permite processar grandes volumes de dados microclimáticos e prever o comportamento térmico das estruturas em diferentes cenários climáticos, oferecendo uma ferramenta de precisão para a tomada de decisão no campo.

Portanto, este artigo busca integrar esses temas — sustentabilidade, bem-estar, mudanças climáticas e tecnologia — para avaliar como diferentes materiais de cobertura podem atuar como barreiras térmicas eficientes. Nas seções seguintes, detalharemos a experimentação com sete protótipos de coberturas (alumínio, polietileno 70%, telhado verde, madeira tratada, fibrocimento com subcobertura reciclada, bambu e telha ecológica). O texto abordará desde a caracterização microestrutural dos materiais por Microscopia Eletrônica de Varredura até a modelagem avançada por Inteligência Artificial, culminando em uma discussão sobre qual material oferece a melhor resposta para um agronegócio de postura que se pretenda ético, energeticamente equilibrado e resiliente frente às instabilidades do clima no século XXI (SASSI, 2025).

Material e Métodos

A metodologia deste trabalho foi estruturada em duas fases complementares: uma fase teórica, baseada em revisões sistemática e bibliométrica, e uma fase experimental de campo, com suporte de técnicas avançadas de caracterização e modelagem.

Revisão Sistemática e Bibliométrica

A fundamentação do estudo compreendeu uma revisão sistemática e bibliométrica da literatura, visando mapear as tendências globais sobre conforto térmico animal e identificar lacunas no uso de materiais sustentáveis e modelagem preditiva. A busca foi conduzida nas bases de dados *Web of Science, Scopus*, *ScienceDirect* e outras, utilizando descritores combinados como "*artificial shading*", "*roofing materials*", "*poultry welfare*" e "*thermal comfort*".

A análise bibliométrica permitiu visualizar as redes de cocitação e o crescimento das publicações sobre materiais biogênicos e economia circular na avicultura, revelando que a integração de modelos de Inteligência Artificial informados pela física ainda é um campo incipiente, o que validou o caráter inovador da presente pesquisa.

Caracterização da Área e Estruturas Experimentais

A pesquisa experimental foi desenvolvida de forma rigorosa no Campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Minas Gerais. A área experimental foi preparada para abrigar sete protótipos em escala reduzida, projetados para simular fielmente as condições de abrigos de campo reais para aves. As estruturas foram instaladas com um pé-direito de 1,5 metros e área de 3,0 m², orientadas rigorosamente no eixo Leste-Oeste. Esta orientação é crucial para a sustentabilidade, pois maximiza a projeção da sombra sob a cobertura durante o período de maior radiação solar zenital, entre as 10:00 e as 15:00 horas.

Tratamentos e Especificações Técnicas

Os tratamentos foram selecionados para representar um gradiente tecnológico e de sustentabilidade, abrangendo desde soluções industriais consolidadas até materiais biogênicos e sistemas vivos. A configuração detalhada de cada estrutura de cobertura utilizada nos sete protótipos experimentais está sintetizada na Tabela 01.

Tratamento	Material de Cobertura	Composição e Características Técnicas	Justificativa de Sustentabilidade
Tratamento 1	Telha de Alumínio	Espessura de 0,5 mm; alta refletividade inicial; superfície metálica densa.	Padrão industrial; referência de durabilidade e refletividade.
Tratamento 2	Tela de Polietileno 70%	Malha porosa de polímero; permite fluxo de ar; cor preta.	Baixo custo; material mais utilizado em piquetes de pequena escala.
Tratamento 3	Telhado Verde	Substrato orgânico (10 cm); vegetação rasteira (*Arachis repens*); camada impermeabilizante.	Resfriamento passivo por evapotranspiração; sequestro de carbono.

Tratamento	Material de Cobertura	Composição e Características Técnicas	Justificativa de Sustentabilidade
Tratamento 4	Madeira Roliça	Troncos de eucalipto tratado; alta densidade; baixa porosidade superficial.	Material renovável; baixíssima energia incorporada e origem local.
Tratamento 5	Fibrocimento + Reciclado	Telha de fibrocimento com pintura branca externa e subcobertura de material tipo Tetra Pak®.	Economia circular; barreira radiante interna com resíduos industriais.
Tratamento 6	Bambu	Colmos de bambu (*Bambusa vulgaris*) dispostos lado a lado; fixação mecânica.	Material biogênico de rápido crescimento; impacto ambiental mínimo.
Tratamento 7	Telha Ecológica	Composto de fibras vegetais e resíduos prensados com betume.	Aproveitamento de resíduos; alternativa de baixo impacto energético.

Tabela 01: Especificações técnicas e justificativa dos tratamentos experimentais de cobertura.
Fonte: Do Autor (2026)

Monitoramento Microclimático e Análise Advanced

A coleta de dados microclimáticos foi realizada durante o verão, utilizando sensores *dataloggers* de alta precisão posicionados a 0,30 m do solo (centro de massa das poedeiras). Foram monitoradas a temperatura de bulbo seco, umidade relativa, temperatura de globo negro e velocidade do ar, permitindo o cálculo do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e da Carga Térmica de Radiação (CTR).

A inovação metodológica consistiu na aplicação de uma Rede Neural Informada pela Física (PINN). Diferente das redes neurais tradicionais, esta integra as equações diferenciais da termodinâmica ao processo de aprendizado, garantindo que as previsões de fluxo de calor respeitem as leis da conservação de energia. Complementarmente, foi realizada a caracterização por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para correlacionar a porosidade superficial com o desempenho térmico observado.

Resultados e Discussão

Síntese da Literatura

A triagem sistemática de 145 artigos permitiu identificar que o fibrocimento e as telhas metálicas ainda são os materiais mais citados, porém, frequentemente associados a críticas sobre alta condutividade térmica sem o uso de subcoberturas. A revisão evidenciou que:

- Materiais Biogênicos: O bambu e a madeira são apontados como tendências para a sustentabilidade familiar, mas carecem de dados sobre durabilidade térmica em longo prazo.

- Subcoberturas Recicladas: Estudos recentes indicam que o uso de barreiras radiantes (como o alumínio de embalagens Tetra Pak®) pode reduzir a carga térmica interna em até 20% em comparação a coberturas simples.

- Modelagem por IA: A revisão confirmou que a transição de modelos estatísticos simples para modelos de Aprendizagem de Máquina (Machine Learning) é a fronteira atual para a gestão da ambiência de precisão, permitindo antecipar crises de estresse térmico antes que afetem a produção (GOMES et al., 2022).

Panorama da Produção Científica

A análise bibliométrica revelou um crescimento de 45% nas publicações sobre bem-estar térmico na avicultura na última década, impulsionado pelas mudanças climáticas globais. A rede de cocitação de palavras-chave destacou três clusters principais: 1) Engenharia de Materiais voltada para coberturas; 2) Fisiologia do estresse térmico; e 3) Agricultura de Precisão. Observou-se que, embora o Brasil seja um dos líderes em publicações sobre ambiência animal, há uma carência de estudos que utilizem redes neurais para prever o balanço de energia em áreas externas de pastejo, o que reforça o ineditismo desta pesquisa (SASSI, 2025).

Desempenho Térmico e Caracterização Microestrutural

Os resultados demonstraram que a morfologia microscópica dos materiais dita o comportamento térmico macroscópico. A estrutura de fibrocimento com pintura branca e subcobertura de material reciclado obteve o desempenho mais eficiente. A análise via MEV revelou uma superfície externa lisa (pela pintura), que maximiza o albedo, e uma subcobertura composta por

múltiplas camadas de polietileno e alumínio reciclado, que funcionam como uma barreira radiante interna, minimizando a emissão de ondas longas para as aves.

Em oposição, a telha de alumínio registrou uma carga térmica elevada. Embora reflita a radiação de ondas curtas, sua alta condutividade térmica (237 W/m.K) facilita a transferência do calor acumulado na face externa para a face interna por condução. Sob baixas velocidades de ar, esta estrutura atua como um radiador de calor sobre as aves, elevando o ITU para níveis críticos. A tela de polietileno 70% apresentou a menor capacidade de proteção; as imagens de microscopia confirmaram que sua porosidade elevada permite a passagem de radiação solar difusa, tornando o microclima sob a tela insalubre em horários de pico solar (PEREIRA et al., 2019).

Análise de Sustentabilidade e Energia Incorporada

A sustentabilidade foi avaliada sob a ótica do custo financeiro e da energia incorporada, cujos dados detalhados encontram-se sintetizados na Tabela 02. Observou-se que materiais biogênicos, como a madeira roliça tratada e o bambu, possuem as menores pegadas energéticas (8,0 e 10,0 MJ/m², respectivamente). O telhado verde, embora apresente o maior custo de instalação (R$ 400,00/m²), demonstrou uma energia incorporada baixa (15,0 MJ/m²) e um desempenho térmico excepcional devido à inércia térmica do substrato, mantendo o ambiente interno até 4°C mais fresco que a temperatura externa em dias de calor extremo (RORIZ et al., 2022).

Material de Cobertura	Carga Térmica (QAI)*	Custo (R$/m²)	Energia Incorporada (MJ/m²)
Fibrocimento + Material Reciclado	Baixa (Ideal)	143,00	25,0
Telhado Verde	Baixa	400,00	15,0
Madeira Roliça Tratada	Moderada	150,00	8,0
Bambu	Moderada	235,00	10,0
Telha de Alumínio	Alta	128,00	215,0
Tela de Polietileno 70%	Muito Alta	107,00	12,0

Tabela 02: Comparativo de desempenho térmico, custo financeiro e energia incorporada dos materiais de cobertura. Fonte: Do Autor (2026)

A estrutura de fibrocimento com subcobertura reciclada consolidou-se como o "ponto de equilíbrio sustentável" (*Sustainable Sweet Spot*). Com um custo intermediário de R$ 143,00/m² e baixa energia incorporada, esta solução protege o principal investimento energético do sistema: a alimentação. Como a ração representa cerca de 80,26% da energia direta consumida na avicultura, o uso de coberturas eficientes evita que as aves desviem energia metabólica da produção de ovos para a termorregulação (SASSI, 2025). Em contrapartida, materiais como o alumínio, apesar do custo de instalação competitivo, apresentam uma pegada energética crítica (215,0 MJ/m²) e baixa eficiência térmica devido à sua alta condutividade (BAÊTA; SOUZA, 2010).

Validação do Modelo de Inteligência Artificial

O modelo de Inteligência Artificial apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,98, indicando uma precisão quase absoluta na predição da carga térmica. Esta ferramenta permitiu identificar que apenas coberturas com alta resistência térmica conseguem mitigar os picos de radiação térmica observados entre 12h e 14h. Conforme apresentado na Tabela 2, a eficiência de redução de calor foi superior nas coberturas que integram princípios de economia circular ou infraestruturas verdes.

A Tabela 02 demonstra que a viabilidade em escala é diretamente influenciada pelo balanço entre eficiência térmica e custos energéticos de produção. Nota-se que o alumínio, apesar de comum no mercado, possui uma viabilidade energética baixa devido à sua altíssima energia incorporada (215,0 MJ/m²), tornando-o desfavorável em projetos que buscam certificações de sustentabilidade e baixa emissão de carbono.

Material de Cobertura	Eficiência de Redução de Calor (%)	Energia Incorporada (MJ/m²)	Viabilidade em Escala
Fibrocimento + Reciclado	25,0	25,0	Alta (Baixo Custo)

Material de Cobertura	Eficiência de Redução de Calor (%)	Energia Incorporada (MJ/m²)	Viabilidade em Escala
Telhado Verde	22,5	15,0	Média (Custo Elevado)
Bambu	15,2	10,0	Alta (Familiar)
Alumínio	5,4	215,0	Baixa (Energética)

Tabela 03: Comparativo de Índices de Conforto Térmico e Sustentabilidade.
Fonte: Do Autor (2026)

Desempenho Térmico e Validação das Revisões

Os resultados experimentais confirmaram as premissas levantadas na revisão sistemática. A eficiência superior do fibrocimento com subcobertura reciclada validou a eficácia das barreiras radiantes multicamadas citadas na literatura. A análise via MEV comprovou fisicamente o que a bibliometria sugeria: a microestrutura do material é o fator determinante para o controle macroclimático.

Energia Direta e Conversão Alimentar

Um achado crítico desta pesquisa refere-se à energia direta do sistema, onde a alimentação das aves representa 80,26% de todo o aporte energético (SASSI, 2025). Em condições de estresse térmico severo, as aves reduzem o consumo de ração e aumentam o gasto de energia metabólica para ativar mecanismos de dissipação de calor, como a respiração ofegante.

Dessa forma, a escolha de materiais como o fibrocimento com subcobertura de material reciclado ou o telhado verde não deve ser vista apenas como uma melhoria de infraestrutura, mas como uma estratégia de eficiência energética nutricional. Ao manter a carga térmica de radiação em níveis toleráveis, essas coberturas garantem que a energia química da ração seja convertida em produção de ovos e não em trabalho termorregulador (SASSI, 2025). Esta visão sistêmica da energia corrobora os estudos de Santos e Lucas Júnior (2004) sobre o balanço energético em galpões avícolas.

Implicações para o Bem-estar Animal e Mercado

A Microscopia Eletrônica de Varredura confirmou que a rugosidade superficial e a porosidade dos materiais biogênicos, como o bambu e a madeira roliça, auxiliam na criação de uma camada limite de ar que retarda a transferência de calor. No contexto do sistema free-range, garantir áreas de sombra de qualidade é um requisito ético e produtivo.

A queda na qualidade da casca e a redução da massa do ovo são consequências diretas da alcalose respiratória induzida pelo calor excessivo (WASTI et al., 2020). O estresse térmico prolongado desequilibra o balanço ácido-básico das aves, impactando severamente a rentabilidade do produtor. A implementação de estruturas de sombreamento validadas por ciência de dados, como proposto neste estudo, oferece uma salvaguarda contra perdas econômicas e assegura a conformidade com as normas internacionais de bem-estar animal, como as da Humane Farm Animal Care (HFAC, 2014).

Considerações Finais

A sustentabilidade no agronegócio contemporâneo transcende a simples redução de custos, exigindo a integração de conhecimentos técnicos avançados, economia circular e ética produtiva. O sombreamento em piquetes de pastejo para sistemas free-range é, portanto, um elemento estratégico indispensável para viabilizar a avicultura de postura frente ao aquecimento global.

Os resultados deste estudo, fundamentados inicialmente por uma revisão sistemática e bibliométrica, confirmam que a literatura científica global caminha para a substituição de materiais convencionais por soluções de baixo impacto e alta inteligência tecnológica. A revisão bibliométrica evidenciou que o uso de redes neurais e materiais biogênicos são as fronteiras atuais do conhecimento, validando a abordagem multidisciplinar adotada nesta pesquisa (SASSI, 2025).

Este estudo conclui que a estrutura composta por fibrocimento branco e subcobertura de material reciclado (Tetra Pak®) é a solução mais equilibrada, oferecendo alta eficiência térmica com baixa energia incorporada e viabilidade financeira. Essa recomendação técnica encontra respaldo na revisão sistemática, que aponta o uso de barreiras radiantes recicladas como uma das formas mais eficazes de mitigação térmica com o menor custo energético de produção.

O telhado verde apresenta-se como a opção de maior valor ecológico, sendo indicado para sistemas de nicho que buscam máxima resiliência térmica, conforme observado nas tendências de infraestrutura verde mapeadas na fase de revisão. Materiais renováveis como o bambu e a madeira roliça consolidam-se como alternativas viáveis para a sustentabilidade de base familiar, aliando eficiência térmica a uma baixíssima pegada de carbono.

A adoção de ferramentas de vanguarda, como a Inteligência Artificial informada pela física, deve ser incorporada ao planejamento rural. A precisão do modelo desenvolvido ($R^2 = 0,98$) preenche a lacuna metodológica identificada na revisão da literatura, oferecendo uma ferramenta robusta para o campo. Ao investir em ambiência de precisão e em materiais de cobertura validados cientificamente, o produtor brasileiro assegura a continuidade de sua atividade em um clima em transformação, protegendo a vida animal, otimizando os recursos do planeta e garantindo a rentabilidade e a aceitação global do setor no longo prazo.

Referências Bibliográficas

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16437: **Bem-estar animal — Produção de ovos — Requisitos para sistemas de criação de galinhas poedeiras**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

BAÊTA, F. C.; SOUZA, C. F. **Ambiência em edificações rurais: conforto animal**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2010. 246 p.

BARBOSA FILHO, J. A. D. **Caracterização do ambiente produtivo de aves de postura em diferentes sistemas de alojamento. 2004. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)** – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.

CAMPOS, A. T. et al. Balanço energético em sistemas de produção agrícola. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 416-425, 2003.

GOMES, R. C. et al. Inteligência artificial na ambiência animal: tendências e perspectivas para a avicultura de precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Biosistêmica**, v. 16, n. 2, p. 145-158, 2022.

HFAC - HUMANE FARM ANIMAL CARE. **Animal care standards: laying hens**. 2014. Disponível em: http://www.certifiedhumane.org. Acesso em: 15 dez. 2025.

PEREIRA, M. L. et al. Influence of roofing materials on microclimate and energy balance in poultry systems. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 138, p. 1235–1247, 2019.

RORIZ, A. et al. Green roofs for free-range poultry: thermal regulation and sustainability. **Ecological Engineering**, v. 187, p. 106693, 2022.

SANTOS, R. F. et al. Balanço energético em sistemas de produção agrícola: um estudo de caso. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 3, p. 216–223, 2018.

SANTOS, T. M. B.; LUCAS JÚNIOR, J. Balanço energético em galpão de frangos de corte. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 25-36, 2004.

SASSI, G. C. **Avaliação do desempenho térmico de estruturas de sombreamento para áreas de pastejo de galinhas poedeiras**. 2025. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2025.

SIQUEIRA, R. et al. Balanço de energia na implantação e manejo de plantas de cobertura de solo. **Engenharia Agrícola**, v. 19, n. 1, p. 80-89, 1999.

SOUZA, C. V. et al. Análise energética em sistema de produção de suínos com aproveitamento dos dejetos. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 4, p. 547-557, 2009.

SOUZA, P. et al. Use of industrial residues in poultry housing: thermal performance and sustainability. **Journal of Environmental Management**, v. 272, p. 111065, 2020.

YANAGI JUNIOR, T. et al. Caracterização espacial do ambiente térmico em galpão de produção de aves de postura. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 1, p. 1-12, 2011.

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E BIG DATA NO MONITORAMENTO E CONTROLE DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA COM ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

1 Janks Karbdala Leal de Paiva, 2 Milena Faria Pinto, 3 Marcelo Rodrigues dos Anjos

1 Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ), e-mail: janks.paiva@aluno.cefet-rj.br; 2 Laboratório De Controle e Automação (LACEA), Avenida Maracanã 229, Bairro Maracanã, Bloco E, 2° andar.20.271-110 – Rio de Janeiro, RJ , Brasil, e-mail: milena.pinto@cefet-rj.br; 3 Laboratório de Ictiologia e Ordenamento Pesqueiro do Vale do rio Madeira (LIOP), Rua 29 de Agosto, 786 Centro, Humaitá 69800-000, AM, Brasil, e-mail: anjos@ufam.edu.br

Palavras-chave: Poluição atmosférica; Análise de dados ambientais; Sustentabilidade.

Resumo

A urgência climática tem reposicionado a Inteligência Artificial (IA) e o *Big Data* no centro das estratégias de monitoramento ambiental. Este estudo realiza revisão sistemática com análise bibliométrica para mapear tendências, atores e lacunas na aplicação de IA a gestão de emissões atmosféricas e áreas correlatas. Observa-se crescimento acentuado de publicações pós-2020, sinalizando convergência entre maturidade tecnológica e pressão regulatória e social. Na Scopus, identificaram-se 31 artigos e revisões (2017–2024); na *Web of Science*, 620 registros apenas em 2024, sugerindo maior cobertura temática desta base. Padrões de coocorrência revelam a centralidade de "*artificial intelligence*", "*big data*" e "*air pollution*", com clusters que articulam métodos (*machine* e *deep learning*), sensoriamento (satélites e redes móveis) e aplicações (qualidade do ar, saúde e riscos naturais). A liderança geográfica varia por base: China, Estados Unidos e Índia na Scopus; Índia, Alemanha e Austrália na *Web of Science* (em 2024), refletindo diferenças de escopo, indexação e janela temporal. A síntese temática evidencia o papel da IA na previsão de eventos (ozônio, PM), gestão hídrica e agro, vigilância florestal, detecção de desmatamento, previsão de enchentes, detecção de incêndios florestais, processos industriais e valorização energética de resíduos, além da gestão de resíduos sólidos; com ganhos de precisão e velocidade que qualificam políticas públicas e decisões regulatórias. Persistem desafios críticos: infraestrutura computacional, governança e privacidade de dados, capacitação técnica e reprodutibilidade. Conduzido no CEFET-RJ em colaboração com a UFAM, o estudo oferece um mapa integrado das capacidades, limites e oportunidades da IA para a gestão ambiental e propõe linhas futuras para análises comparativas entre bases e métodos e avaliações de impacto em políticas e resultados ambientais.

Introdução

O acelerado desenvolvimento tecnológico implica em significativas transformações no cotidiano das pessoas ao redor do planeta. Embora os fundamentos teóricos da computação remontem aos trabalhos pioneiros de Alan Turing, na primeira metade do século XX, onde estabeleceram as bases lógico-formais que orientariam o desenvolvimento dos sistemas computacionais, é no contexto contemporâneo que tais tecnologias passam a ser efetivamente incorporadas como instrumentos estratégicos para a mitigação de lacunas historicamente persistentes nos mais diversos campos do conhecimento. Entre as tecnologias mais relevantes da atualidade, o uso da Inteligência Artificial (IA) cresce em diferentes campos de forma exponencial [18]. Contudo, apesar dos grandes avanços obtidos a partir do surgimento dessas ferramentas inovadoras, o planeta enfrenta problemas socioambientais provenientes das alterações climáticas. As emissões atmosféricas, intensificadas pelas ações antrópicas, são a principal causa do aquecimento global. Este crescente processo é responsável pela intensificação dos eventos extremos vivenciados nas diversas partes do mundo [17]. A inteligência artificial (IA) é um segmento da ciência da computação que visa a criação de sistemas capazes de executar tarefas que normalmente requerem a inteligência humana [14]. Recentemente, essa ferramenta tomou diferentes rumos, demonstrando a grande versatilidade de suas aplicações. Esse recurso é capaz de realizar atividades como reconhecimento de padrões, aprendizado, lógica, tomada de decisão e processamento de linguagem natural. Essa modernidade, fundamenta-se em algoritmos avançados e modelos matemáticos que permitem a simulação de processos cognitivos, possibilitando que máquinas percebam o ambiente em que estão inseridas, interpretem dados complexos e executem ações de forma autônoma [23]. Diante desse novo instrumento, o aprendizado de máquina se destaca como uma das técnicas mais importantes para o funcionamento da IA e da *Internet* das coisas (IoT), onde os sistemas são treinados utilizando grandes volumes de dados para identificar padrões e realizar previsões [21]. Esse treinamento é realizado através de algoritmos específicos que ajustam seus parâmetros com base nos dados de entrada, melhorando continuamente a precisão dos resultados sem a necessidade de programação explícita para cada tarefa individual. Além disso, o aprendizado profundo ou "*Deep Learning*" é uma subcategoria do aprendizado de máquina que utiliza as redes neurais artificiais com múltiplas camadas para modelar relações não lineares complexas em grandes conjuntos de dados [16]. As aplicações de IA abrangem uma ampla gama de novos setores, englobando diferentes soluções em todas as áreas do conhecimento. Popularmente, houve uma escala na produção de veículos autônomos que utilizam IA para processar dados de sensores e tomar decisões de navegação em tempo real. Esse fato, demonstra apenas uma das múltiplas aplicações que a IA tem sido utilizada junto com o desenvolvimento tecnológico [15]. Essa ferramenta possui um significativo potencial para auxiliar no combate das alterações climáticas que estão ocorrendo de forma mais perceptível nas últimas décadas. A utilização da IA associadas a outros instrumentos é de suma importância para

desenvolver mecanismos para combater as emissões atmosféricas, principal responsável pelo aquecimento global [5]. As emissões de poluentes atmosféricos contribuem tanto para intensificação da crise climática, como para o crescimento das consequências adversas na saúde das pessoas. Dessa forma, a avaliação da exposição individual à poluição do ar é fundamental para a análise dos riscos à saúde pública, sem desconsiderar a relevância de outros impactos associados, como a perda de serviços ecossistêmicos, a redução da biodiversidade e as alterações nas dinâmicas ecológicas.[13]. Ainda hoje, os principais poluentes atmosféricos primários que causam grandes consequências tanto para o ambiente como para a saúde humana são: dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e material particulado (PM). Alguns estudos apontam que a exposição demasiada a materiais particulados pode ocasionar depressão, pensamentos suicidas e doenças neurológicas [10]. Diante o exposto, o presente trabalho tem por objetivo demonstrar as principais e mais pertinentes aplicações dessas novas tecnologias capazes de contribuir para o controle e monitoramento das emissões atmosféricas no planeta terra.

Material e Métodos

O presente estudo sobre a aplicação das novas tecnologias (IA e *Big Data*) para o controle e monitoramento das emissões atmosféricas, utilizou-se como método a técnica de análise bibliométrica associada a revisão sistemática da literatura. Esse trabalho foi desenvolvido em resposta à crescente preocupação com as mudanças climáticas, cujos impactos têm se intensificado e despertado atenção significativa da comunidade científica nos últimos anos. A implementação dessas metodologias permite demonstrar de forma quantitativa, mediante o uso da bibliometria, quanto qualitativa, por meio de estudos específicos através da revisão sistemática, a evolução dos estudos no decorrer do tempo. Essa sinergia possibilita uma análise aprofundada e abrangente da progressão de temas e conteúdo, proporcionando uma compreensão mais completa acerca do desenvolvimento das pesquisas científicas [20]. A busca por artigos científicos e revisões da literatura, decorreu através de bases de dados de qualidade e confiabilidade. Dessa forma, utilizou-se as bases de dados *Web of Science* e *SCOPUS* para realizar as buscas do material teórico, pelo fato da relevância quando comparada a outras bases, contendo publicações em periódicos indexados com alto fator de impacto e mais completa. Para realizar as buscas na base *Web of Science*, foram definidas as seguintes palavras-chave e seus sinônimos: *Artificial Intelligence*, *Control*, *Monitoring*, *Big Data* e *Atmospheric Emissions*. Dessa forma, combinando as palavras-chave com os algarismos booleanos e filtrando o ano das publicações, idioma em inglês e as áreas temáticas de interesse, formou-se a *string* de busca: Refine *results for Artificial Intelligence* OR AI AND *Control* AND *Monitoring* AND *Big Data* AND *Atmospheric Emissions* (*All Fields*) and *Review Article or Article* (*Document Types*) and 2024 (*Publication Years*) and English (*Languages*) and *Meteorology Atmospheric Sciences or Environmental Sciences Ecology* (*Research Areas*). Por conseguinte, as buscas na base *SCOPUS*, foram definidas as seguintes palavras-chave e seus sinônimos: *Artificial Intelligence, Control, Monitoring, Big Data e Atmospheric Emissions*. Em seguida, combinou-se as palavras-chave com os algarismos booleanos e filtrou-se os campos de interesse, formou-se a string de busca: TITLE-ABS-KEY ("*artificial intelligence*" AND "*big data*" AND "*air pollution*") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")). Posteriormente, a partir dos dados coletados nos resultados de cada busca, desenvolveu-se o aprimoramento das palavras sinônimas por meio do *software OPENREFINE*. Em sequência, empregou-se o software *VOSVIEWER* para obter os indicadores bibliométricos de forma mais precisa e detalhada.

Resultados

A análise bibliométrica realizada com o software *VOSviewer* sobre as bases de dados revelou tendências significativas e padrões emergentes na pesquisa sobre o uso de Inteligência Artificial (IA) e *Big Data* na monitorização e controlo de emissões atmosféricas. Utilizando a metodologia de busca, na base de dados *SCOPUS*, a pesquisa identificou um total de 31 artigos e revisões bibliográficas relevantes publicados entre 2017 e 2024, evidenciando um crescimento significativo no número de publicações a partir de 2020, coincidindo com avanços tecnológicos no período da pandemia de COVID-19 e uma maior conscientização global sobre a crise climática. A análise dos termos mais frequentes e das redes de coocorrência de palavras-chave, mostradas pela Figura 1, destacou que os conceitos mais citados incluem "*artificial intelligence*", "*big data*" e "*air pollution*". Estes termos formaram clusters interligados, indicando uma forte interdependência entre as técnicas de IA e os métodos de monitorização ambiental. Além disso, as redes de interligação e a densidade de palavras-chave, apresentada pela Figura 2, revelaram que nos últimos anos as palavras-chave "*air quality*", "*air pollutants*" e "*algorithm*" têm aparecido mais nas publicações. Esse fato revela que existe um interesse do mundo acadêmico nesse tema em voga, em função de haver uma relação com a pauta das mudanças climáticas. Ademais, quanto ao número de publicações, os dados revelaram que os principais países contribuidores para este campo são China, Estados Unidos e Índia com uma considerável colaboração internacional comparada aos demais países. Em continuidade, utilizando a método descrito no trabalho, na base de dados *Web of Science* foram identificados 620 artigos e revisões bibliográficas pertinentes publicadas apenas no ano de 2024. Esse fato mostra que nesta base existem mais publicações pertinentes ao tema quando comparada com a base citada anteriormente, demonstrando a relevância de utilizar combinação de buscas nas diferentes bases para conseguir alcançar um número maior de publicações relacionadas às palavras-chave de busca. A análise dos termos mais frequentes e das redes de coocorrência de palavras-chave, mostradas pela Figura 3, destacou que os conceitos mais citados incluem *"artificial intelligence", "deep learning"* e *"machine learning"*. Estes termos formaram clusters interligados, indicando uma consolidada interdependência entre as técnicas de IA e o emprego da tecnologia no desenvolvimento das soluções de combate às alterações climáticas. Essa análise, também permitiu identificar que existem pesquisas utilizando palavras relacionadas a mudanças climáticas, poluição, big data, tecnologia e sustentabilidade. Esse fato, analogamente a anterior, corrobora a preocupação e uma tendência em investir em soluções para frear o avanço das alterações climáticas.

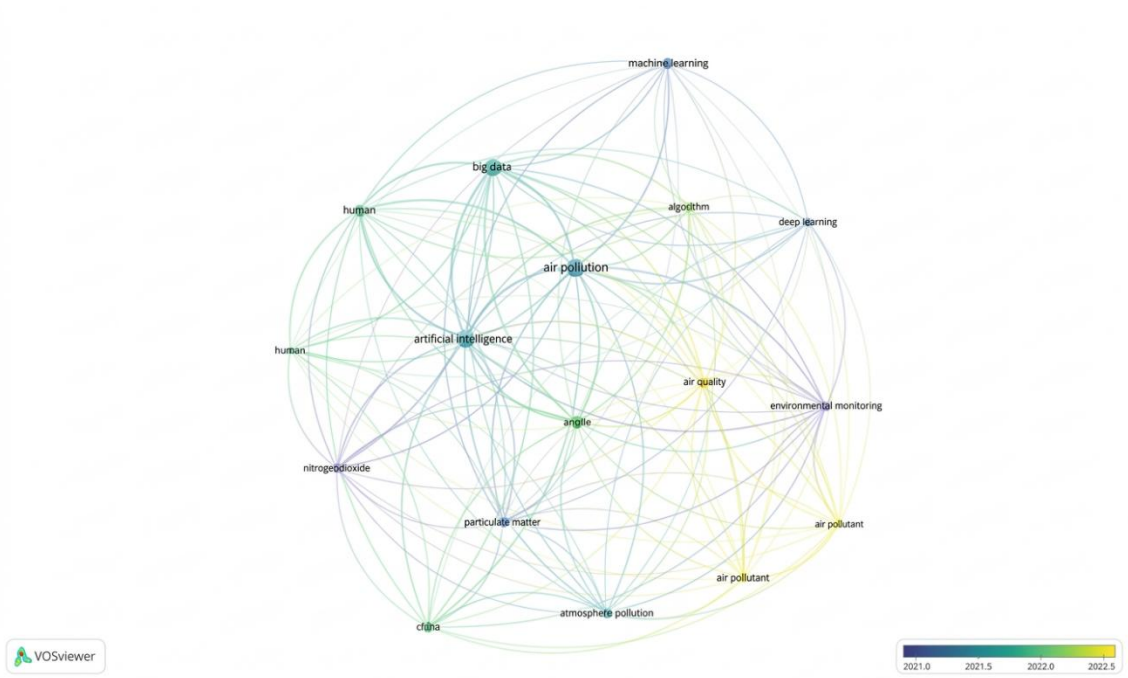


Figura 01: Resultado *Scopus* - Coocorrência de palavras-chave (*SCOPUS*).
Fonte: Autor (2024)

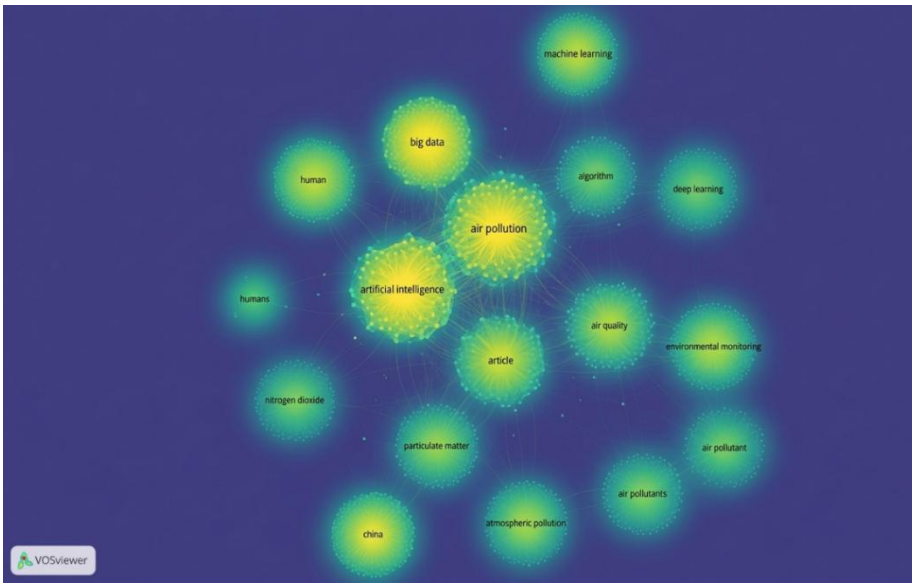


Figura 02: Resultado *Scopus* - Densidade de palavras-chave (*SCOPUS*).
Fonte: Autor (2024)

Além disso, as redes de interligação e a densidade de palavras-chave, apresentada pela Figura 4, revelaram que as palavras-chave "*artificial intelligence*", "*deep learning*" e "*machine learning*" estão mais presentes nas publicações que abordam o tema em questão. Essas palavras revelam o quão importante a tecnologia está se tornando nos últimos anos, uma vez que suas aplicações são aplicáveis em todas as áreas do conhecimento. Dessa forma, é notório a importância da IA para melhorar a forma com que seja possível analisar grandes volumes de dados em um curto espaço de tempo. Consequentemente, o monitoramento e controle dos poluentes atmosféricos é possível ser realizado de forma eficiente e assertiva, a fim de apoiar os tomadores de decisões a promoverem políticas públicas que favoreçam o ambiente e as pessoas. Ademais, quanto ao número de publicações em 2024, os dados revelaram que os principais países contribuidores para este campo são Índia, Alemanha e Austrália, com 55, 39 e 31 publicações respectivamente, como mostra a Figura 5.

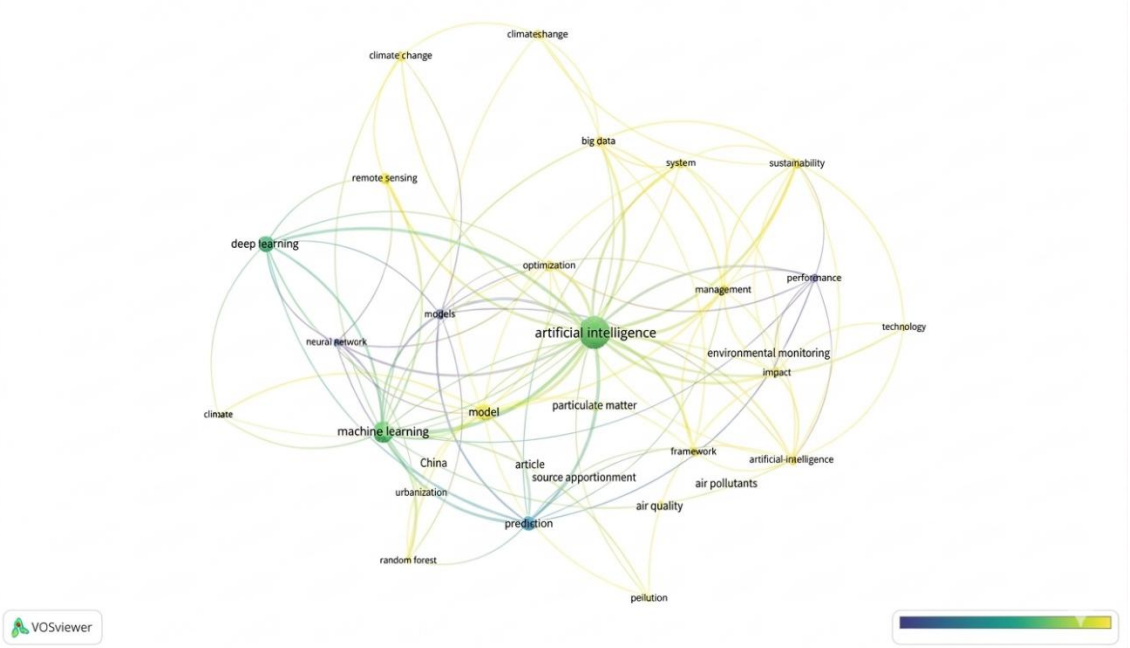


Figura 03: Resultado *Web of Science* - Coocorrência de palavras-chave (*WEB OF SCIENCE*).
Fonte: Autor (2024)

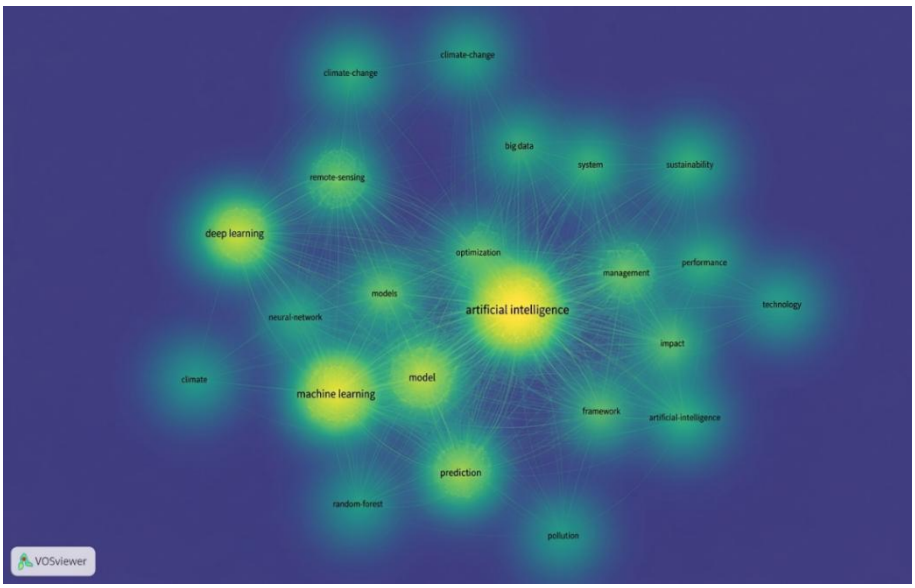


Figura 04: Resultado *Web of Science* - Densidade de palavras-chave (*WEB OF SCIENCE*).
Fonte: Autor (2024)



Figura 05: Resultado *Web of Science* - Número de publicações por país (*WEB OF SCIENCE*).
Fonte: Autor (2024)

Discussão

A aplicação de IA na otimização de algoritmos matemáticos permite estimar com alta precisão a evapotranspiração de referência em áreas específicas. Essa abordagem é relevante em regiões com escassez hídrica, em que a dependência dos fatores climáticos é acentuada. Dessa forma, a utilização de modelos avançados de IA possibilita estimativas rigorosas da evapotranspiração, viabilizando o manejo eficiente e sustentável da irrigação. Esse aprimoramento promove uma gestão mais eficaz dos recursos hídricos, essencial para a agricultura e a conservação ambiental em áreas vulneráveis. Assim, a IA se apresenta como uma ferramenta indispensável na mitigação dos impactos climáticos decorrentes da escassez de água e na adoção de práticas agrícolas sustentáveis e resilientes [1]. Já no campo da saúde, os agentes tóxicos presentes no ambiente estão associados a uma variedade de doenças nos grupos da sociedade mais vulneráveis, como crianças, gestantes, idosos e pacientes clínicos portadores de comorbidades. Desse modo, observa-se que a poluição do ar está associada a um aumento na morbimortalidade, destacando a necessidade de estudos toxicológicos focados na poluição atmosférica industrial absorvida pela população em geral. Nesse contexto, é fundamental o desenvolvimento de um sistema automatizado de monitoramento dos poluentes baseado em princípios de toxicologia ambiental [2]. As principais fontes de poluição do ar incluem atividades agrícolas, a queima de combustíveis fósseis, aquecimento residencial, desastres naturais e emissões industriais. Essa poluição possui um impacto pertinente na saúde humana, fato este que despertou a atenção da comunidade científica para suas consequências. Assim, partículas sólidas, líquidas e os hidrocarbonetos suspensos no ar são os principais contribuintes para a poluição atmosférica. Estas substâncias podem ser liberadas por automóveis, indústrias, partículas de areia, toxinas, formações rochosas e incêndios florestais. Por isso, compreender essas fontes e seus impactos é essencial para desenvolver estratégias eficazes de mitigação e políticas ambientais que protejam a saúde pública [2]. Outra abordagem inovadora e relevante dessa tecnologia, é empregá-la para monitorar o desmatamento e as mudanças no uso da terra em projetos de créditos de carbono florestais. Assim, ao utilizar sistemas de IA é possível detectar com precisão e antecipar atividades de desmatamento, possibilitando a implementação de estratégias conservacionistas. Desse modo, evitar o desflorestamento não apenas preserva os ecossistemas, mas também reduz as emissões de gases de efeito estufa (GEE) que contribui para o aquecimento global [3]. O sensoriamento remoto conseguiu ampliar suas aplicações através da integração com os novos sistemas inteligentes. O monitoramento térmico de vulcões ativos é um grande exemplo de estudo de como a IA permite auxiliar o controle e monitoramento dessa região. Essa integração favorece o acompanhamento em tempo real da ejeção de cinzas e gases atmosféricos lançados no ambiente. Desse modo, fica evidente que a sinergia entre IA e sensoriamento remoto representa um avanço na compreensão de fenômenos geológicos, proporcionando caminhos para a mitigação de riscos naturais e a proteção de comunidades vulneráveis. A capacidade de monitorar a atividade vulcânica de forma precisa e contínua oferece uma nova perspectiva para a prevenção de desastres e a gestão de crises [4]. Além do sensoriamento remoto, nota-se que a relação entre empoderamento digital e cooperação para o desenvolvimento industrial verde e de baixo carbono destaca a importância da integração da tecnologia digital na promoção da sustentabilidade ambiental e na mitigação das mudanças climáticas. Por isso, existe a necessidade da adoção de políticas e práticas que incentivem a utilização de tecnologias digitais em diversos setores, bem como a cooperação entre governos, empresas e sociedade civil para maximizar os benefícios do desenvolvimento industrial sustentável. Ademais, ao valorizar a pesquisa empírica, o estudo oferece uma base sólida para a formulação de políticas baseadas em evidências, essenciais para garantir a eficácia das ações em prol do desenvolvimento sustentável [6]. A necessidade de cooperação para se alcançar o desenvolvimento sustentável se justifica, uma vez que a poluição atmosférica gera consequências negativas na saúde humana e acaba desempenhando um papel essencial nas escolhas habitacionais das pessoas. Algumas pesquisas mostraram que os fatores determinantes dos preços imobiliários incluem a influência da poluição atmosférica [7]. Assim, com a utilização da IA associada à *big data* é possível criar soluções para conter as emissões de CO_2. As emissões de dióxido de carbono em países com distintos níveis de renda, utilizando algoritmos sofisticados [12]. Em países de baixa renda, o setor agrícola surge como um dos principais impulsionadores das emissões de CO_2, acompanhado dos setores industrial e de serviços. Em contrapartida, em nações de alta renda, observa-se uma distribuição diferenciada dos principais influenciadores, destacando-se os setores de serviços, agrícola e industrial. Essas descobertas destacam a complexidade das dinâmicas de emissões de CO_2 em diferentes realidades econômicas, ressaltando a necessidade de estratégias de mitigação adaptadas a cada contexto [8]. Outro ponto relevante que deve ser levado em conta, é o da escassez de estações de monitoramento do ar, que apresenta desafios significativos na pesquisa ambiental. Por essa razão, utilizar dados de satélite e análises climáticas para estimar concentrações de poluentes atmosféricos oferece uma solução promissora, expandindo a cobertura espacial e temporal. No entanto, é essencial garantir a validade e precisão desses modelos de IA, bem como abordar questões éticas quanto à manipulação de dados sensíveis. Porém, a integração de dados geográficos e sociais pode enriquecer a compreensão dos padrões de poluição e suas implicações para a saúde pública. Desse modo, essa abordagem tem o potencial de aprimorar significativamente a monitorização da qualidade do ar e informar políticas ambientais mais eficazes [9]. Perante a necessidade de mais investimento para monitoramento, a dicotomia entre o crescimento econômico e a garantia da qualidade ambiental no planeta é elevada quando o tema é a poluição atmosférica. As especulações imobiliárias nos países em desenvolvimento, com a finalidade de criar áreas industriais, torna-se uma grande ameaça ambiental em termos de lançamento de GEE. O desenvolvimento da IA permitiu com que pesquisadores conseguissem monitorar e comparar os resultados de regiões sensíveis quanto ao lançamento de poluentes atmosféricos. Segundo o estudo [29], as áreas industriais em regiões em desenvolvimento elevaram o nível de emissões em 31% e 55%, em contrapartida, em locais de países desenvolvidos os índices foram de 3% e 8%, respectivamente. Outro ponto de destaque para a aplicação da tecnologia, é na economia marinha que exerce um importante papel no desenvolvimento económico, e pode ser considerada o avanço da transformação para muitos países costeiros. Desse modo, o desenvolvimento verde e a

avaliação do impacto ambiental tornaram-se o foco da investigação nestes países [28]. Alguns estudos implementaram a tecnologia de sensoriamento remoto para aumentar a eficiência da observação das emissões de carbono oceânicas. Demonstrando a importância das novas tecnologias, como a análise de grandes volumes de dados, machine learning e o sensoriamento remoto para combater as emissões carbonáceas [11]. Além das zonas marinhas, existe o desenvolvimento de modelos de redes neurais artificiais (RNA) para a previsão de enchentes, a utilização de tecnologias avançadas como sensoriamento remoto e machine learning se destaca como uma solução eficaz para problemas climáticos. Os sensores telemétricos fluviométricos e produtos de chuva de sensoriamento remoto, exemplificam como a tecnologia pode fornecer dados importantes para a construção de modelos preditivos mais precisos. Além disso, a aplicação de algoritmos de otimização, evidencia o papel do machine learning na melhoria da precisão das previsões. Esses avanços tecnológicos não só facilitam a gestão eficiente de recursos hídricos, mas também oferecem uma alternativa viável para regiões com baixa densidade de estações pluviométricas e atmosféricas [27]. Diante o exposto, outra aplicação relevante ocorre no contexto florestal. O avanço da tecnologia desempenha um importante papel no monitoramento de incêndios florestais, em que o melhoramento da IA promove avanços substanciais na detecção e na mitigação dos eventos de incêndio. Assim, a utilização de algoritmos de aprendizado de máquina possibilita a análise de grandes volumes de dados, permitindo a identificação precoce de padrões que indicam a emergência de focos de incêndio. Essa abordagem não só aprimora a precisão na previsão de áreas de risco, como também otimiza a alocação de recursos para combate. Ademais, a integração de dados provenientes de satélites, sensores terrestres e condições climáticas, analisados por sistemas de machine learning, fortalece a capacidade de resposta das equipes de emergência no combate às emissões de poluentes atmosféricos que intensificam o aquecimento global. Nesse contexto, a tecnologia contribui para a preservação ambiental, a proteção de vidas humanas e a salvaguarda de propriedades, consolidando-se como um componente essencial na gestão eficiente de incêndios florestais [22]. Além do monitoramento instantâneo de florestas a fim de se evitar a perda de vegetação e o aumento dos poluentes na atmosfera terrestre, as aplicações da tecnologia em projetos florestais proporcionam um melhor gerenciamento dessas áreas. Desse modo, a melhoria da tecnologia de aplicações para smartphones apresenta uma oportunidade para permitir a monitorização econômica, com boa mobilidade, bem como para alinhar melhor os indicadores medidos e os objetivos dos esforços de restauração florestal. Porém, ainda existem lacunas na implementação desse mecanismo, é necessário o acesso aberto, com a capacidade de padronizar o monitoramento em toda a comunidade de restauração, ajudaria a fornecer evidências e consistência para informar os resultados da restauração automaticamente. Implementar a tecnologia nesses locais, é de extrema importância, tendo em vista que as florestas são sumidouros de carbono, colaborando para o combate do aquecimento global [24]. Entre as diferentes aplicações de IA no tocante às emissões de poluentes atmosféricos, na incineração de resíduos sólidos municipais esse conjunto de ferramentas representa um caminho significativo para a concretização dos objetivos de transformação de resíduos em energia. Essa valorização energética é relevante no contexto atual, uma vez que os resíduos sólidos urbanos são considerados um problema para muitos países. Desse modo, a IA tem o potencial de facilitar o controle ideal do processo de valorização de resíduos em termos de alcançar emissões mínimas de poluição e máxima eficiência energética. Esse processo decorre através de uma rígida monitorização nas etapas do processo através de metodologias inovadoras de respostas rápidas [25]. No setor industrial, as emissões de poluentes de fábricas de produtos químicos constituem uma preocupação ambiental preeminente. Nesse cenário, a implementação de modelos preditivos de emissões é fundamental para a tomada de decisões estratégicas voltadas à redução de poluentes atmosféricos. Modelos baseados em aprendizado de máquina são desenvolvidos e submetidos a rigorosos testes para prever as emissões de dióxido de enxofre (SO_2) que é um poluente prejudicial ao meio ambiente. A alta precisão desses modelos permite a detecção de padrões e tendências nas emissões, facilitando a elaboração de estratégias de mitigação eficazes. Ademais, a aplicação de técnicas avançadas de machine learning aprimora significativamente a capacidade de monitoramento em tempo real e a resposta a flutuações nas emissões, contribuindo para a redução do impacto ambiental das atividades industriais [26].

Considerações Finais

Considera-se que a integração da inteligência artificial e da big data no controle e monitoramento das emissões atmosféricas é uma alternativa para conseguir alcançar o desenvolvimento responsável. Essas novas tecnologias permitem o rápido processamento de grandes volumes de dados que servem para sustentação formular ações mais eficazes. Assim, melhora a precisão na detecção e mitigação de poluentes, mas também facilita a tomada de decisões proativas para proteger a saúde pública e o meio ambiente. No entanto, a adoção dessas tecnologias traz grandes desafios, uma vez que existe a necessidade de uma infraestrutura robusta, a garantia de privacidade e segurança dos dados, além da capacitação de profissionais são obstáculos que precisam ser superados. Dessa forma, a colaboração entre governos, indústrias, instituições de pesquisa e a sociedade civil será essencial para enfrentar esses desafios e maximizar os benefícios das inovações tecnológicas.

Limitações do estudo e sugestões de pesquisas futuras

A metodologia adotada, ou seja, *strings* de busca, sinônimos, idioma, recorte temporal e tipos de documento, pode ter excluído estudos relevantes, sobretudo aqueles indexados com vocabulário alternativo ou publicados em outros idiomas. Essa limitação recomenda análises de sensibilidade com expansão de termos, inclusão multilíngue e verificação por *snowballing* (citações e referências). No escopo bibliométrico, a análise concentrou-se em coocorrência de termos e mapas de densidade, o que fornece visão robusta da estrutura temática, mas ainda parcial do campo. Pesquisas futuras devem ampliar o diagnóstico com redes de coautoria, mapeamento de instituições e fontes (periódicos e anais) e métricas de impacto (citações brutas e normalizadas por área), de modo a capturar lideranças, padrões colaborativos e canais de difusão do conhecimento. Complementarmente, a

aplicação de overlays temporais (evolução por períodos) e a comparação entre domínios, são eles: saúde, indústria, florestas e ambiente marinho, pode revelar trajetórias de maturação dos métodos, evidenciando fases de adoção, consolidação e transferência tecnológica entre setores. Por fim, recomenda-se que estudos subsequentes avancem da potencialidade para a mensuração de impacto em contextos em que a IA já esteja operacionalizada. Indicadores como redução percentual de erro (MAE/RMSE em O_3 e material particulado), ganhos de tempo/latência computacional, custos evitados (OPEX/CAPEX) e emissões evitadas (tCO_2eq), entre outros, permitirão estimar benefícios líquidos. Desenhos quase-experimentais (antes-depois com controles) e modelagem contrafactual podem fortalecer a atribuição causal e informar políticas públicas e decisões regulatórias com maior precisão.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca e à Universidade Federal do Amazonas pelo apoio institucional e pelas condições oferecidas para a realização desta pesquisa. Reconhecem, ainda, a colaboração e o comprometimento do Prof. Dr. Marcelo Rodrigues dos Anjos e da Profa. Dra. Milena Faria Pinto, cujas contribuições foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

[1] Al-Hasani, A. A. J., & Shahid, S. (2024). Development of radiation and temperature-based empirical models for accurate daily reference evapotranspiration estimation in Iraq. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 1-22.

[2] Asha, P., Natrayan, L. B. T. J. R. R. G. S., Geetha, B. T., Beulah, J. R., Sumathy, R., Varalakshmi, G., & Neelakandan, S. (2022). IoT enabled environmental toxicology for air pollution monitoring using AI techniques. Environmental research, 205, 112574.

[3] Blanton, A., Mohan, M., Galgamuwa, G. P., Watt, M. S., Montenegro, J. F., Mills, F., ... & Ewane, E. B. (2024). The status of forest carbon markets in Latin America.

[4] Cariello, S., Corradino, C., Torrisi, F., & Del Negro, C. (2023). Cascading machine learning to monitor volcanic thermal activity using orbital infrared data: From detection to quantitative evaluation. Remote Sensing, 16(1), 171.

[5] Chen, L., Chen, Z., Zhang, Y., Liu, Y., Osman, A. I., Farghali, M., & Yap, P. S. (2023). Artificial intelligence-based solutions for climate change: a review. Environmental Chemistry Letters, 21(5), 2525-2557.

[6] Di, K., Chen, W., Shi, Q., Cai, Q., & Zhang, B. (2024). Digital empowerment and win-win co-operation for green and low-carbon industrial development: Analysis of regional differences based on GMM-ANN intelligence models. Journal of Cleaner Production, 141332.

[7] Doan, Q. C., Chen, C., He, S., & Zhang, X. (2024). How urban air quality affects land values: Exploring non-linear and threshold mechanism using explainable artificial intelligence. Journal of Cleaner Production, 434, 140340.

[8] El-Aal, A., & Mohamed, F. (2024). The relationship between CO2 emissions and macroeconomics indicators in low and high-income countries: using artificial intelligence. Environment, Development and Sustainability, 1-22.

[9] Fania, A., Monaco, A., Pantaleo, E., Maggipinto, T., Bellantuono, L., Cilli, R., ... & Bellotti, R. (2024). Estimation of Daily Ground Level Air Pollution in Italian Municipalities with Machine Learning Models Using Sentinel-5P and ERA5 Data. Remote Sensing, 16(7), 1206.

[10] Go, T. H., Kim, M. H., Choi, Y. Y., Han, J., Kim, C., & Kang, D. R. (2024). The short-term effect of ambient particulate matter on suicide death. Environmental health, 23(1), 3.

[11] Gu, Z., & Zeng, M. (2023). The Use of Artificial Intelligence and Satellite Remote Sensing in Land Cover Change Detection: Review and Perspectives. Sustainability, 16(1), 274.

[12] Guo, D., Li, Y., Xie, D., & Sun, D. (2024). Driving factors and key paths of greenhouse gas and air pollutants synergistic control using hybrid multiple-criteria decision-making. Frontiers in Environmental Science, 12, 1155409.

[13] Hu, Z., Huang, L., Zhai, X., Yang, T., Jin, Y., & Xu, Y. (2023). Quantifying Individual PM2. 5 Exposure with Human Mobility Inferred from Mobile Phone Data. Sustainability, 16(1), 184.

[14] Huang, M., Li, X., Yang, M., & Kuai, X. (2024). Intelligent coverage and cost-effective monitoring: Bus-based mobile sensing for city air quality. Computers, Environment and Urban Systems, 108, 102073.

[15] Macharia, V. M., Garg, V. K., & Kumar, D. (2023). A review of electric vehicle technology: Architectures, battery technology and its management system, relevant standards, application of artificial intelligence, cyber security, and interoperability challenges. IET Electrical Systems in Transportation, 13(2), e12083.

[16] Mitchell, M. (2024). Debates on the nature of artificial general intelligence. Science, 383(6689), eado7069.

[17] Nath, S. J., Girach, I. A., Harithasree, S., Bhuyan, K., Ojha, N., & Kumar, M. (2024). Urban ozone variability using automated machine learning: inference from different feature importance schemes. Environmental Monitoring and Assessment, 196(4), 393.

[18] Pavlovic, M., Ilic, S., Ralevic, N., Antonic, N., Raffa, D. W., Bandecchi, M., & Culibrk, D. (2024). A Deep Learning Approach to Estimate Soil Organic Carbon from Remote Sensing. Remote Sensing, 16(4), 655.

[19] Pirani, A., Fuglestvedt, J. S., Byers, E., O'Neill, B., Riahi, K., Lee, J. Y., ... & Tebaldi, C. (2024). Scenarios in IPCC assessments: lessons from AR6 and opportunities for AR7. npj Climate Action, 3(1), 1.

[20] Pizzi, S., Caputo, A., Corvino, A., & Venturelli, A. (2020). Management research and the UN sustainable development goals (SDGs): A bibliometric investigation and systematic review. Journal of Cleaner Production, 276, 124033. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124033.

[21] Popescu, S. M., Mansoor, S., Wani, O. A., Kumar, S. S., Sharma, V., Sharma, A., ... & Chung, Y. S. (2024). Artificial intelligence and IoT driven technologies for environmental pollution monitoring and management. Frontiers in Environmental Science, 12, 1336088.

[22] Qayyum, F., Jamil, H., Alsboui, T., & Hijjawi, M. (2024). Wildfire risk exploration: leveraging SHAP and TabNet for precise factor analysis. Fire Ecology, 20(1), 10.

[23] Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Machine learning and artificial intelligence in CNC machine tools, a review. Sustainable Manufacturing and Service Economics, 2, 100009.

[24] Schweizer, D., Cole, R. J., Werden, L. K., Cedeño, G. Q., Rodriguez, D., Navarro, K., ... & Crowther, T. W. (2024). Review and assessment of smartphone apps for forest restoration monitoring. Restoration Ecology, e14136.

[25] Tang, J., Wang, T., Xia, H., & Cui, C. (2024). An Overview of Artificial Intelligence Application for Optimal Control of Municipal Solid Waste Incineration Process. Sustainability, 16(5), 2042.

[26] Thameem, M., Raj, A., Berrouk, A., Jaoude, M. A., & AlHammadi, A. A. (2024). Artificial intelligence-based forecasting model for incinerator in sulfur recovery units to predict SO2 emissions. Environmental Research, 118329.

[27] Uliana, E. M., Aires, U. R. V., da Cruz, I. F., Lisboa, L., da Silva, D. D., Viola, M. R., & Duarte, V. B. R. (2024). Nowcast flood predictions in the Amazon watershed based on the remotely sensed rainfall product PDIRnow and artificial neural networks. Environmental Monitoring and Assessment, 196(3), 1-21.

[28] Wang, B., Hua, L., Al-Mohaimeed, A. M., & Zhao, N. (2024). Ocean carbon emission prediction and management measures based on artificial intelligence remote sensing estimation in the context of carbon neutrality. Environmental Research, 118591.

[29] Yoo, C., Xiao, H., Zhong, Q. W., & Weng, Q. (2024). Unequal impacts of urban industrial land expansion on economic growth and carbon dioxide emissions. Communications Earth & Environment, 5(1), 203.

DA AUDITORIA ENERGÉTICA ÀS PLATAFORMAS DIGITAIS: UM MODELO SAAS PARA GESTÃO ENERGÉTICA ESCALÁVEL E INTEGRAÇÃO ESG

Regina Lucia de Deus, Raphael de Aquino Gomes
Instituto Federal de Goiás (IFG), e-mail: reginaluciarld@gmail.com

Palavras-chave: Gestão energética; Inteligência artificial; Descarbonização

Resumo

Este estudo propõe um modelo de gestão energética orientado a dados, aplicado a um sistema híbrido real, integrando indicadores-chave como fator de potência (FP), distorção harmônica total (THD) e consumo de energia. A pesquisa fundamenta-se na análise de medições obtidas por analisador de qualidade de energia, permitindo a identificação de condições críticas associadas às diferentes fontes energéticas, incluindo rede elétrica, geração fotovoltaica e sistema de backup.

Como diferencial, o modelo incorpora técnicas de aprendizado de máquina para identificação automática de padrões operacionais e suporte à tomada de decisão, ampliando a capacidade analítica em ambientes energéticos complexos. Os resultados evidenciam que o desempenho do sistema varia significativamente conforme as condições operacionais, destacando períodos críticos de degradação da qualidade da energia.

Além do aspecto técnico, o estudo demonstra que a melhoria da eficiência energética está diretamente associada à redução de impactos ambientais, com mitigação mensurável de emissões de CO_2, reforçando o papel da engenharia no processo de descarbonização.

Como contribuição, apresenta-se um modelo escalável alinhado aos princípios ESG e à transformação digital, com potencial de implementação em plataforma Software as a Service (SaaS).

Keywords: Energy management; Artificial intelligence; Decarbonization.

Abstract

This study proposes a data-driven energy management model applied to a real hybrid energy system, integrating key indicators such as power factor (PF), total harmonic distortion (THD), and energy consumption. The research is based on measurements obtained from a power quality analyzer, enabling the identification of critical operating conditions associated with different energy sources, including grid supply, photovoltaic generation, and backup systems.

As a key contribution, the model incorporates machine learning techniques to automatically identify operational patterns and support decision-making, enhancing analytical capabilities in complex energy environments. The results demonstrate that system performance varies significantly depending on operational conditions, highlighting critical periods of power quality degradation.

Beyond the technical perspective, the study shows that improvements in energy efficiency are directly linked to environmental benefits, including measurable reductions in CO_2 emissions, reinforcing the role of engineering in the decarbonization process.

As a contribution, the study presents a scalable model aligned with ESG principles and digital transformation, with potential implementation as a Software as a Service (SaaS) platform, enabling continuous monitoring and data integration.

Introdução

O aumento da demanda por energia elétrica, aliado à diversificação das fontes de geração e às exigências por sustentabilidade, tem impulsionado a adoção de sistemas híbridos de energia, que combinam rede elétrica, geração fotovoltaica e sistemas de backup (IEA, 2023; ANEEL, 2022). Esses sistemas contribuem para a eficiência energética e segurança no fornecimento, mas introduzem desafios relacionados à qualidade da energia elétrica.

A interação entre diferentes fontes pode impactar indicadores como fator de potência (FP) e distorção harmônica total (THD), comprometendo o desempenho do sistema. Nesse contexto, a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina tem se destacado como ferramenta promissora para análise e diagnóstico energético (HASTIE et al., 2009; AHMAD et al., 2020).

Este estudo está estruturado em três pilares: institucional, técnico e ambiental. O objetivo é analisar a qualidade da energia em um sistema híbrido real e propor um modelo escalável de gestão energética baseado em dados.

Além disso, a crescente digitalização dos sistemas energéticos tem impulsionado a adoção de soluções baseadas em dados, permitindo maior precisão no diagnóstico e na tomada de decisão. Nesse cenário, a integração entre monitoramento em tempo real, análise de dados e ferramentas computacionais torna-se essencial para a melhoria contínua do desempenho energético, especialmente em sistemas híbridos, caracterizados por maior variabilidade operacional.

Fundamentação Teórica

A gestão energética evoluiu para uma abordagem estratégica baseada em indicadores de desempenho e melhoria contínua, conforme diretrizes estabelecidas pela norma ISO 50001 (ISO, 2018). No Brasil, normas técnicas como o PRODIST definem critérios para qualidade da energia, incluindo limites para fator de potência e distorções harmônicas (ANEEL, 2022).

Sistemas híbridos aumentam a complexidade operacional, exigindo ferramentas analíticas avançadas (MONTANHER et al., 2021). Nesse contexto, técnicas de aprendizado de máquina permitem identificar padrões e prever condições críticas, sendo amplamente utilizadas em sistemas energéticos (GOODFELLOW et al., 2016; GÉRON, 2019).

Além disso, a eficiência energética está diretamente associada à redução das emissões de CO_2, especialmente em sistemas com geração fotovoltaica, reforçando a importância da integração entre tecnologia e sustentabilidade (MCTI, 2023; WRI, 2023).

Além disso, a crescente digitalização dos sistemas energéticos tem impulsionado a adoção de soluções baseadas em dados, permitindo maior precisão no diagnóstico e na tomada de decisão. Nesse cenário, a integração entre monitoramento em tempo real, análise de dados e ferramentas computacionais torna-se essencial para a melhoria contínua do desempenho energético, especialmente em sistemas híbridos, caracterizados por maior variabilidade operacional.

Nesse contexto, a integração entre técnicas de aprendizado de máquina e sistemas energéticos representa uma evolução significativa em relação às abordagens tradicionais. A capacidade de processar grandes volumes de dados e identificar padrões complexos permite uma análise mais robusta do comportamento do sistema, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais eficientes, inteligentes e sustentáveis.

Metodologia

A metodologia integra análise de dados, aprendizado de máquina e arquitetura SaaS para gestão energética. Os dados foram obtidos por meio de analisador de qualidade de energia em sistema híbrido, permitindo a avaliação de parâmetros elétricos em condições reais de operação.

O estudo foi aplicado no Clube de Engenharia de Goiás (CENG), entidade representativa da engenharia regional, utilizada como ambiente real de análise (CENG, 2026).

Os dados foram processados considerando diferentes condições operacionais. Foram aplicados modelos de aprendizado de máquina, como Random Forest e XGBoost, amplamente utilizados na análise de dados complexos (BREIMAN, 2001; CHEN; GUESTRIN, 2016).

A arquitetura proposta baseia-se em modelo SaaS, permitindo monitoramento contínuo e suporte à decisão em tempo real, conforme abordagens modernas de gestão energética digital (HAQUE et al., 2020).

Adicionalmente, a abordagem metodológica adotada permite a replicabilidade do modelo em diferentes contextos organizacionais, especialmente em instituições que operam sistemas híbridos de energia. A integração entre análise de dados, aprendizado de máquina e arquitetura digital contribui para a construção de sistemas energéticos mais inteligentes, resilientes e sustentáveis.

Resultados e Discussão

Os resultados evidenciaram que o desempenho do sistema varia conforme as condições operacionais. O período entre 12h e 15h apresentou maior incidência de redução do fator de potência devido à geração fotovoltaica, enquanto o intervalo entre 18h e 21h apresentou degradação associada ao uso do gerador. Observou-se correlação entre baixos valores de FP e aumento da THD, indicando influência de cargas não lineares e da dinâmica operacional do sistema, conforme definido na literatura técnica sobre qualidade da energia (IEEE, 2010).

A aplicação de aprendizado de máquina permitiu identificar automaticamente períodos críticos, aumentando a confiabilidade da análise e reforçando a aplicabilidade dessas técnicas em sistemas energéticos (AHMAD et al., 2022). Do ponto de vista ambiental, a geração fotovoltaica resultou na mitigação de aproximadamente 8,935 toneladas de CO_2, equivalente à preservação de 61,64 árvores, evidenciando a contribuição da eficiência energética para a descarbonização (MCTI, 2023).

Esses resultados demonstram a relação direta entre qualidade da energia, eficiência energética e descarbonização. Observa-se que a degradação do fator de potência associada ao aumento da distorção harmônica total evidencia a necessidade de estratégias integradas de monitoramento e controle.

Além disso, a identificação de períodos críticos por meio de técnicas de aprendizado de máquina reforça a importância da utilização de ferramentas analíticas avançadas no contexto da gestão energética. A antecipação dessas condições permite a implementação de ações corretivas mais eficientes, contribuindo para a melhoria do desempenho operacional do sistema. Do ponto de vista prático, os resultados obtidos indicam que a integração entre análise de dados e gestão energética pode gerar ganhos significativos tanto na eficiência elétrica quanto na redução de impactos ambientais, consolidando-se como uma abordagem estratégica para sistemas híbridos modernos. Adicionalmente, os resultados evidenciam que a utilização de ferramentas computacionais avançadas permite não apenas a análise do comportamento atual do sistema, mas também a construção de cenários futuros, contribuindo para uma gestão energética mais proativa. Esse aspecto é fundamental em ambientes operacionais complexos, nos quais a antecipação de falhas e a otimização de desempenho são fatores críticos para a eficiência do sistema.

Considerações Finais

O modelo proposto demonstrou elevado potencial de aplicação em contextos reais, ao integrar análise de dados, modelagem computacional e gestão energética.

Os resultados evidenciaram que o desempenho do sistema está diretamente associado às condições operacionais e à interação entre as fontes de energia, destacando períodos críticos.

A melhoria da eficiência energética mostrou impacto direto na redução de emissões, reforçando o papel da engenharia na descarbonização e na sustentabilidade (MCTI, 2023; WRI, 2023).

A integração entre os pilares institucional, técnico e ambiental reforça a importância de abordagens multidisciplinares no desenvolvimento de soluções energéticas inovadoras. Nesse sentido, o modelo proposto contribui não apenas para a análise da qualidade da energia, mas também para a consolidação de práticas sustentáveis alinhadas às demandas atuais do setor energético.

O uso de arquitetura SaaS amplia o potencial do modelo, permitindo monitoramento contínuo e aplicação em diferentes contextos.

Assim, o estudo contribui para a integração entre eficiência, inovação e sustentabilidade.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *PRODIST – Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica*. Brasília, 2022.

AHMAD, T.; ZHANG, H.; YAN, B. Machine learning applications in renewable energy forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 118, 2020.

AHMAD, T.; CHEN, H. Nonlinear autoregressive neural network model for prediction of electricity consumption in buildings. *Energy and Buildings*, v. 254, 2022.

BREIMAN, L. Random forests. *Machine Learning*, v. 45, n. 1, p. 5–32, 2001.

CHEN, T.; GUESTRIN, C. XGBoost: A scalable tree boosting system. In: *Proceedings of the ACM SIGKDD*, 2016.

CLUBE DE ENGENHARIA DE GOIÁS. História do Clube de Engenharia de Goiás. Disponível em: https://clubedeengenharia.com.br/historia/. Acesso em: 09 abr. 2026.

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press, 2016.

GÉRON, A. *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn*. O'Reilly, 2019.

HAQUE, A. N. M. M. et al. IoT-based energy management system for smart grids. *IEEE Access*, v. 8, 2020.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. *The Elements of Statistical Learning*. Springer, 2009.

IEEE. IEEE Standard 1459-2010: Definitions for Electric Power Quantities. 2010.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Snapshot of Global PV Markets 2023*. 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 50001: Energy Management Systems*. 2018.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). Fatores de emissão de CO_2 do sistema interligado nacional. 2023.

MONTANHER, L. et al. Análise de sistemas híbridos de energia no contexto brasileiro. *Revista Brasileira de Energia*, v. 27, n. 2, 2021.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. *GHG Protocol Corporate Standard*. 2023.

APRENDIZADO DE MÁQUINA NA PREVISÃO DE VAZÃO DO RIO SÃO FRANCISCO

1 Welson de Avelar Soares Filho, 2 Paula Roberta Souza Carvalho, 3 Leonardo Goliatt da Fonseca, 4 Celso Bandeira de Melo Ribeiro

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais - IF Sudeste MG (Campus Juiz de Fora), e-mail: welson.avelar@ifsudestemg.edu.br; 2 Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, e-mail: paulasouza.carvalho@estudante.ufjf.br; 3 Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, e-mail:leonardo.goliatt@ufjf.br; 4 Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, e-mail: celso.bandeira@ufjf.br

Palavras-chave: Regressão linear; *CatBoost*; *Random Forest*.

Resumo

A previsão de vazão é fundamental diante do cenário de mudanças climáticas e seus impactos. Nesse contexto, os modelos computacionais têm auxiliado no processo de tomada de decisão, especialmente frente às limitações dos modelos físicos tradicionais, que frequentemente demandam grande volume de dados e processos complexos de calibração. O presente estudo apresenta a aplicação de aprendizado de máquina, incluindo Regressão Linear, *CatBoost* e *Random Forest*, para a previsão diária de vazão no rio São Francisco, em Minas Gerais, Brasil. O conjunto de dados, abrangendo o período de 2013 a 2023, foi preparado utilizando uma combinação de ferramentas em *Python* e funções de extração personalizadas. Os valores ausentes foram imputados por meio da replicação de padrões sazonais e os modelos foram avaliados com base nas métricas KGE, MAPE, PBIAS e cobertura empírica. Os resultados destacam o potencial do aprendizado de máquina como uma solução eficiente e economicamente viável, com destaque para a Regressão Linear, que apresentou excelente desempenho. Além disso, os modelos puderam ser executados de forma eficiente em *hardware* modesto, o que amplia sua aplicabilidade em contextos com recursos limitados. Ademais, os resultados demonstram o potencial dessas técnicas para apoiar a tomada de decisão e o planejamento operacional por órgãos gestores de recursos hídricos. O estudo contribui para a literatura científica ao preencher uma lacuna relacionada ao uso de aprendizado de máquina nesse contexto regional.

Introdução

Os impactos crescentes das mudanças climáticas tornam cada vez mais evidente a necessidade de aprimorar a gestão dos recursos hídricos. No Brasil, essa questão é particularmente relevante devido à forte dependência da geração hidrelétrica, que responde por cerca de 64% da produção total de eletricidade (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2023). Esse cenário reforça a importância da disponibilidade contínua de água para atender à demanda energética. Nesse sentido, a previsão de vazões desempenha papel fundamental na operação de reservatórios, ao indicar situações em que a capacidade pode ser comprometida, contribuindo para evitar déficits de energia e reduzir impactos econômicos negativos.

A gestão dos recursos hídricos, no entanto, não se limita ao setor energético. Os rios também fornecem água para consumo doméstico, agricultura e pecuária, sendo que a precipitação influencia diretamente os padrões de uso. A estimativa de vazões futuras permite que as autoridades públicas regulem de forma mais eficaz as outorgas de uso da água e, quando necessário, implementar medidas de racionamento. Tais decisões visam garantir o abastecimento contínuo de água potável, proteger a produção agrícola e manter o bem-estar social.

A ocorrência de eventos climáticos extremos reforça ainda mais a necessidade de sistemas de previsão confiáveis. Episódios recentes de enchentes e tempestades severas em estados como Minas Gerais, Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul demonstram como esses eventos podem resultar em danos materiais expressivos e perdas humanas. Além disso, populações em situação de vulnerabilidade tendem a ser mais afetadas, especialmente considerando que cerca de 3,6 bilhões de pessoas vivem sob alto risco frente às mudanças climáticas (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2023).

Soares Filho (2024) realizou uma revisão sistemática voltada à identificação de estudos que aplicam técnicas de aprendizado de máquina na modelagem chuva-vazão em rios e bacias hidrográficas de Minas Gerais. A pesquisa foi estruturada com base no critério PICO (Problema, Intervenção, Comparação e *Outcome*/Resultado) e utilizou as seguintes bases: *Scopus*, *Science Direct* e *Web of Science*. Dos 355 trabalhos encontrados, foram selecionados apenas 18 trabalhos aderentes de acordo com os critérios de inclusão e exclusão, demonstrando que a área ainda apresenta lacunas significativas e demanda maior desenvolvimento científico.

Entre os estudos selecionados, destaca-se o de Gomaa *et al.* (2023), que investigou a aplicação de algoritmos híbridos de aprendizado de máquina na previsão da vazão diária do reservatório de Três Marias, situado na bacia do Rio São Francisco, no Brasil. Para isso, foram utilizados dados de precipitação provenientes da missão *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), além de registros observados de vazão, abrangendo o período de 1998 a 2019. O estudo examinou a relação entre precipitação e escoamento por meio de modelos de aprendizado de máquina.

Saraiva *et al.* (2021) desenvolveram um trabalho em que aborda a previsão de vazão diária no reservatório de Sobradinho, localizado no nordeste do Brasil, utilizando modelos de aprendizado de máquina acoplados a transformadas *wavelet* e técnicas de *bootstrapping*.

Já Vilanova *et al.* (2020) realizaram um trabalho de calibração e transferência de modelos baseados em *deep learning*, mais exatamente Redes Neurais Artificiais (RNAs), para a simulação de vazões em sub-bacias da Mata Atlântica brasileira, sendo o foco a bacia do rio Itapemirim. O estudo utilizou dados diários de 32 anos de precipitação e vazão consistidos em 12 sub-bacias.

Nesse contexto, a integração de previsões mais precisas de vazão com políticas de prevenção de desastres mostra-se essencial para reduzir riscos, fortalecer a segurança pública e promover o uso sustentável dos recursos hídricos. Assim, o presente estudo busca contribuir para a compreensão da dinâmica chuva-vazão no rio São Francisco, avaliando modelos de aprendizado de máquina para previsão de vazão, como Regressão Linear - *Linear Regression* (LR), *CatBoos*t (CB) *e Random Forest* (RF). Os resultados esperados possuem relevância prática, podendo subsidiar a tomada de decisão por parte de gestores públicos, além de oferecer uma alternativa eficiente e de menor custo em comparação com modelos hidrológicos tradicionais.

Material e Métodos

Com uma extensão de quase 3.000 quilômetros, o rio São Francisco conecta diversas regiões, culturas e economias. Sua bacia hidrográfica, apresentada na Figura 01, abrange aproximadamente 639.000 quilômetros quadrados, cerca de 8% do território brasileiro, e impacta diretamente cerca de 15 milhões de pessoas. Estendendo-se por seis estados, o rio é dividido em quatro regiões fisiográficas, cada uma com características geográficas e socioeconômicas distintas (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2026).



Figura 01: Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco.

Conhecido como "Velho Chico", o rio atravessa múltiplos biomas, refletindo elevada diversidade ecológica. Esse aspecto se manifesta no uso do solo em sua bacia, que envolve atividades de agricultura, pecuária e áreas florestais. Sua vazão sustenta diferentes setores econômicos, incluindo a indústria, a pesca e a produção agrícola, reforçando seu papel estratégico no desenvolvimento regional e na conservação ambiental (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2026).

A coleta dos dados foi realizada utilizando a biblioteca HydroBR, funções próprias de extração de dados e consultando o sistema da Rhama Analysis. A biblioteca possibilitou listar todas as estações pluviométricas e fluviométricas na área do estudo e selecionar as estações de interesse. Desenvolveu-se um conjunto de funções em *Python* para automatizar o processo de extração dos dados das estações utilizadas no estudo referentes ao período de 2013 a 2023.

No presente estudo, a estação alvo, isto é, a estação que se pretendia prever a vazão foi a Pedras de Maria da Cruz (Código 44290002). As estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas estão listadas na Tabela 1. Foram utilizadas estações convencionais e telemétricas, sendo que nas estações telemétricas de precipitação realizou-se o somatório para um dia e nas estações telemétricas de vazão utilizou-se a média de um dia.

Convencionais				
Fluviométricas				
Código	**Nome**	**Município**	**Latitude**	**Longitude**
44290002	Pedras de Maria da Cruz	Pedras de Maria da Cruz	-15,6011	-44,3967
Telemétricas				
Pluviométricas/Fluviométricas				
01544017	Pedras de Maria da Cruz	Januária	-15,5978	-44,3903
01544032	Usina do Pandeiros montante	Januária	-15,4831	-44,7672
01544036	Lontra	Lontra	-15,9056	-44,3072

Tabela 01: Estações utilizadas na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco.

A estação alvo (c_vz_44290002) do rio São Francisco apresentou uma série praticamente completa no período de análise, como pode-se observar na Figura 02, com apenas 120 dias nulos em um total de 4.017 dias. Assim, apenas o preenchimento sazonal foi suficiente para suprir as lacunas existentes, ou seja, utilizou-se a média do mesmo dia nos três últimos anos (Figura 03).



Figura 02: Série temporal incompleta da estação alvo.

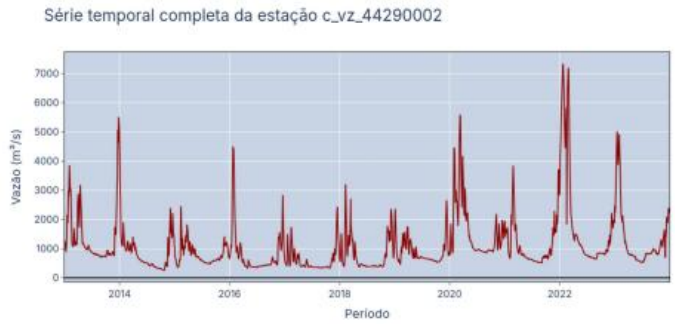


Figura 03: Série temporal completa com preenchimento sazonal da estação alvo.

No que tange às estações de precipitação selecionadas para a análise no rio São Francisco, estavam com as séries completas no período de estudo, abrangendo um total de 4.017 registros. As séries temporais das estações Pedras de Maria da Cruz (Código 01544017), Usina do Pandeiros montante (Código 01544032) e Lontra (Código 01544036) podem ser visualizadas nos gráficos apresentados na Figura 04, Figura 05 e Figura 06, respectivamente.



Figura 04: Série temporal completa da estação Pedras de Maria da Cruz (Código 01544017).



Figura 05: Série temporal completa da estação Usina do Pandeiros montante (Código 01544032).



Figura 06: Série temporal completa da estação Lontra (Código 01544036).

O conjunto de teste corresponde aos dados de 2023, enquanto os demais formam o conjunto de treino. Foi realizado um processo diário de ajuste (*fit*) e previsão (*predict*) ao longo de um ano, simulando o uso real de um sistema e permitindo avaliar tanto a qualidade das previsões quanto a estabilidade dos modelos.

Esse procedimento, conhecido como *Walk-Forward Validation* (WFV), foi aplicado com janela expandida. Para as previsões, optou-se pelo método recursivo com reajustes (*refit*) do modelo, em vez de criar múltiplos modelos independentes (*direct forecasting*), o que demandaria alto consumo de memória. Os modelos do estudo são considerados dinâmicos, pois o WFV permite capturar mudanças ao longo do tempo e avaliar de forma mais realista a capacidade de generalização para o futuro.

O desempenho do modelo de previsão utilizado no estudo foi avaliado com base nas seguintes métricas: *Kling-Gupta Efficiency* (KGE), *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) e *Percent Bias* (PBIAS), além da cobertura empírica. A escolha dessas métricas baseia-se na necessidade de uma avaliação abrangente que considere diferente aspectos de qualidade das previsões, como precisão, erro médio, tendência e correlação.

A métrica KGE oferece uma avaliação conjunta do desempenho do modelo ao considerar, ao mesmo tempo, três aspectos: correlação, viés e variabilidade relativa entre os valores simulados e os observados. Ela é particularmente útil em estudos hidrológicos, pois consegue representar melhor a complexidade das relações entre variáveis desse tipo quando comparada a métricas que analisam apenas um único fator. Quanto mais próximo de 1 for o seu valor, melhor é o desempenho do modelo.

A MAPE é uma medida bastante utilizada para avaliar a precisão das previsões em termos percentuais, calculando a média dos erros absolutos entre valores observados e estimados. Por não depender da escala dos dados, permite comparações entre diferentes séries temporais e modelos. Valores mais próximos de 0 indicam maior precisão.

O PBIAS mede o viés das previsões, indicando se o modelo tende a superestimar (quando positivo) ou subestimar (quando negativo) os valores observados. Ele expressa a diferença percentual entre a soma dos valores previstos e a dos observados, ajudando a identificar tendências sistemáticas de erro. Um PBIAS igual a 0 significa que não houve diferença entre previsão e observação.

A Figura 07 apresenta o fluxograma do trabalho para melhor compreensão.

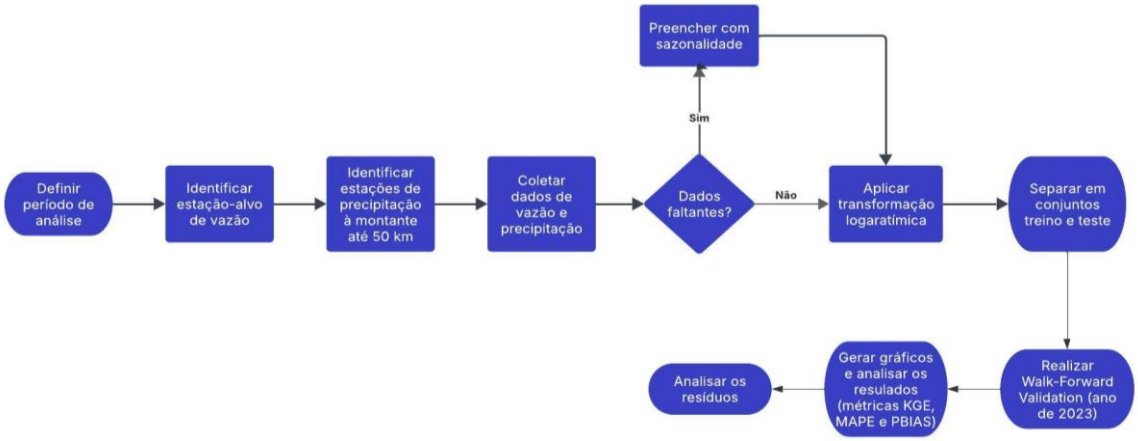


Figura 07: Fluxo de trabalho.

Resultados e Discussão

A Tabela 01 apresenta os resultados de avaliação do desempenho dos modelos Regressão Linear - *Linear Regression* (LR) - uma transformação logarítmica (log) foi aplicada para reduzir a volatilidade dos dados -, *CatBoost* (CB) e *Random Forest* (RG) de previsão de vazão para o rio São Francisco, considerando as métricas KGE, MAPE, PBIAS e cobertura empírica.

Modelo	KGE	MAPE	PBIAS	Cobertura empírica
Linear Regression (log)	0,98472	0,02707	-0,98255	96,71%
CatBoost	0,93396	0,03296	-2,61473	90,68%
Random Forest	0,97754	0,02571	-0,80974	82,47%

Tabela 02: Resultados das métricas dos modelos *Linear Regression*, *CatBoost* e *Random Forest*.

O LR apresentou um valor de KGE de 0,98472, destacando-se pelo maior valor de KGE dentre os modelos, o que corroborou sua elevada capacidade preditiva e eficiência em relação aos dados observados. Por sua vez, o MAPE do modelo LR foi de 0,02707, segundo melhor valor comparado aos outros modelos, perdendo apenas para o modelo RF. Já o PBIAS do modelo foi de -0,98255, indicando um desempenho excelente e um viés sistemático de subestimar previsões quase irrelevante. Em relação à cobertura empírica, o LR alcançou o maior valor com 96,71%, tendo o intervalo de previsão com o melhor desempenho, o que significa que o modelo capturou quase todos os eventos da série de vazões observadas (Figura 08).



Figura 08: *Walk-Forward Validation* para o modelo *Linear Regression*.

O CB registrou um KGE de 0,93396, demostrando que possui boa eficiência nas previsões e que o modelo conseguiu replicar o comportamento hidrológico observado de forma consistente. Já o MAPE apresentou um valor de 0,03296, um percentual médio muito baixo. No que tange ao PBIAS, o modelo CB teve um valor de -2,61473, indicando que o modelo tende a subestimar as vazões. Quanto à cobertura empírica, o CB cobriu 90,68% dos dados, demonstrando uma boa capacidade de captura das incertezas nas previsões (Figura 09).



Figura 09: *Walk-Forward Validation* para o modelo *CatBoost*.

Por fim, o modelo RF registrou um KGE de 0,97754, o que demonstra uma ótima qualidade de previsão com valores próximos aos observados, embora ligeiramente inferior ao modelo LR. Já o MAPE do modelo RF foi de 0,02571, sendo o melhor

modelo nesse quesito de avaliação de desempenho. O RF exibiu um PBIAS de -0,80974, o menor viés dentre todos os modelos, indicando que as previsões praticamente acertaram os valores observados. Entretanto, no que diz respeito à cobertura empírica, o RF apresentou a menor cobertura com um valor de 82,47%, demonstrando que o intervalo de previsão gerado pelo modelo foi mais estreito e, possivelmente, não capturou todas as variações na série de vazão (Figura 10).



Modelo	MAPE	KGE	PBIAS (%)
RandomForest	0.02571	0.97754	-0.80974
RandomForest-lo-95	0.06906	0.94219	-5.12336
RandomForest-hi-95	0.10486	0.93372	6.14794

Cobertura empírica do intervalo de previsão
82.47 %

Figura 10: *Walk-Forward Validation* para o modelo *Random Forest.*

De modo geral, o LR destacou-se como o modelo com maior eficiência na reaplicação do comportamento hidrológico, evidenciado pelo maior valor de KGE e de cobertura empírica e um valor de MAPE e PBIAS próximo ao RF que apresentou o melhor valor nestas métricas de desempenho. No entanto, pode-se dizer que todos os modelos apresentaram resultados bastante competitivos e altamente eficientes para o rio São Francisco.

Os resultados podem ser corroborados por Carvalho *et al.* (2025), que realizaram a modelagem chuva-vazão utilizando o *software* HEC-HMS na porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco e encontraram valores de PBIAS entre -12,05 e 13,48. Em comparação, os modelos do presente trabalho baseados em aprendizado de máquina apresentaram desempenho superior, com valores do mesmo indicador (PBIAS) variando entre -2,61 e -0,81.

Em relação ao gráfico de autocorrelação dos resíduos, pode-se observar na Figura 11 que o modelo LR exibiu alguns resíduos autocorrelacionados nas *lags* iniciais e apresentou resíduos fora da faixa de tolerância no final do período. Contudo, a análise geral indicou que o comportamento do LR foi relativamente estável, suportado por uma faixa de tolerância estreita. Essa estabilidade sugere que, apesar das autocorrelações observadas, o modelo manteve uma consistência na distribuição dos resíduos ao longo do tempo, minimizando a ocorrência de erros sistemáticos.

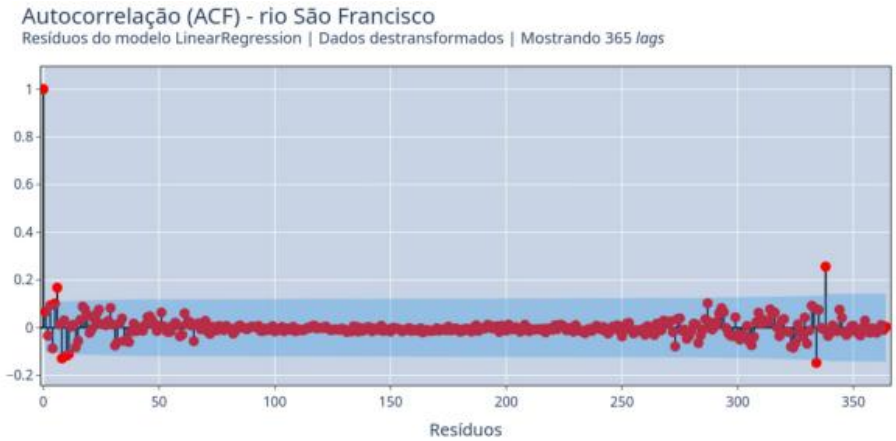


Figura 11: Gráfico Autocorrelação dos resíduos do modelo *Linear Regression.*

O modelo CB também apresentou resíduos autocorrelacionados nas *lags* iniciais, estendendo-se aproximadamente até a *lag* 30 (Figura 12). Posteriormente, os resíduos estabilizaram-se dentro da faixa de tolerância definida, demonstrando uma melhoria na independência dos erros. Notavelmente, mesmo no final do ano, quando os demais modelos exibiram resíduos fora da faixa ou no limite da mesma, o CB continuou a gerar resíduos estáveis, indicando robustez durante todo o período analisado. Nas *lags* iniciais, o CB demonstrou um comportamento sazonal nos resíduos, sugerindo que certos padrões sazonais próximos não foram adequadamente capturados pelo modelo, resultando em autocorrelações residuais persistentes.

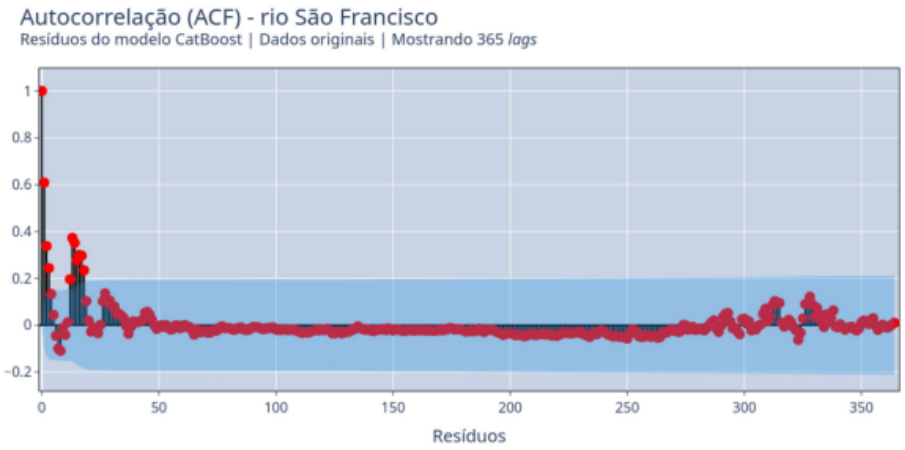


Figura 12: Gráfico Autocorrelação dos resíduos do modelo *CatBoost.*

Finalmente, o modelo RF mostrou-se comportamentalmente semelhante ao modelo LR, apresentando também resíduos autocorrelacionados nas *lags* iniciais. No entanto, o RF não registrou escapadas de resíduos fora da faixa de tolerância no final do período, ficando alguns pontos bem no limite. Além disso, o RF manteve uma faixa de tolerância igualmente estreita, refletindo uma alta qualidade e estabilidade nos resíduos gerados. Juntamente com o modelo LR, o RF destacou-se como um dos modelos que apresentaram maior qualidade e estabilidade na autocorrelação dos resíduos (Figura 13).

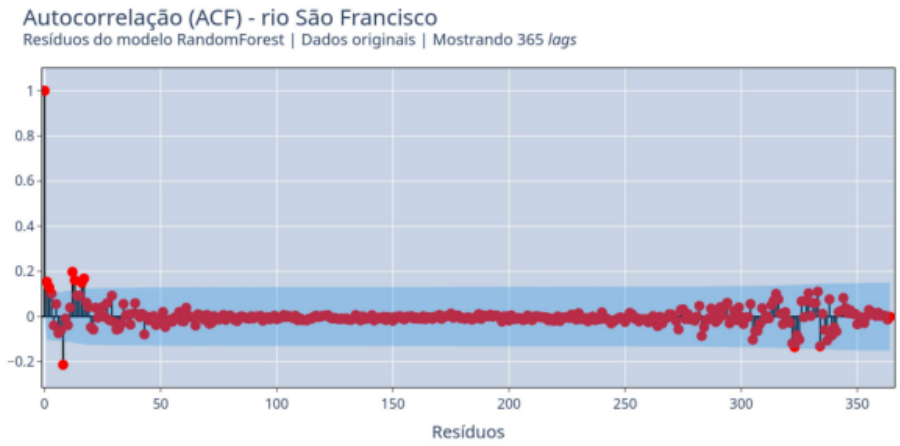


Figura 13: Gráfico Autocorrelação dos resíduos do modelo *Random Forest.*

Considerações Finais

Esta análise comparativa dos modelos de previsão de vazões no rio São Francisco avaliou o desempenho da Regressão Linear, do *CatBoost* e do *Random Forest*. A avaliação considerou aspectos como eficiência preditiva, robustez frente a ruídos nos dados e capacidade de lidar com a complexidade das relações entre precipitação e vazão.

O modelo LR, de forma geral, apresentou o melhor desempenho em duas (KGE e cobertura empírica) de quatro métricas de desempenho e o segundo melhor desempenho nas outras duas (MAPE E PBIAS), apesar dos modelos CB e RF também exibirem bons resultados. A aplicação da transformação logarítmica para linearização simplificou as relações complexas entre os dados de precipitação e vazão, relação bem estabelecida conforme discutido por Collischonn e Dornelles (2015) no contexto do ciclo hidrológico, facilitando a modelagem. No entanto, o desempenho do LR foi significativamente influenciado pela presença de autocorrelação nas *lags*. Esse fator, combinado com a linearização dos dados, reflete a natureza dessa modelagem de séries temporais que emprega *lags* de vazão.

Sendo assim, o objetivo principal do estudo de desenvolver e aplicar determinados modelos de aprendizado de máquina para previsão de vazão foi alcançado e mostrou que é viável a aplicação destes modelos por órgãos de gestão competentes na realização de previsões diárias de vazão para tomada de decisões na gestão de recursos hídricos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) pelo apoio financeiro concedido – processo APQ-01226-22.

Referências Bibliográficas

CARVALHO, P. R. S.; RIBEIRO, C. B. M.; SOARES FILHO, W. A.; FONSECA, L. G. Resposta hidrológica da porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco à modelagem chuva-vazão. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 22, e15, 2025. DOI: https://doi.org/10.21168/rega.v22e15.

COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. *Hidrologia para engenharia e ciências ambientais*. Porto Alegre: ABRH, 2015.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO (CBHSF). *A bacia*. Disponível em: https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/. Acesso em: 15 abr. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). *Balanço energético nacional 2023: ano base 2022 = Brazilian energy balance 2023 year 2022*. Rio de Janeiro: EPE, 2023.

GOMAA, Ehab; ZEROUALI, Bilel; DIFI, Salah; EL-NAGDY, Khaled A.; SANTOS, Celso Augusto Guimarães; ABDA, Zaki; GHONEIM, Sherif S. M.; BAILEK, Nadjem; SILVA, Richarde Marques da; RAJPUT, Jitendra; ALI, Enas. Assessment of hybrid machine learning algorithms using TRMM rainfall data for daily inflow forecasting in Três Marias Reservoir, eastern Brazil. *Heliyon*, [S.l.], v. 9, n. 8, e18819, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18819. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023060279. Acesso em: 10 abr. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate change 2023: synthesis report – summary for policymakers*. [S.l.]: IPCC, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pd. Acesso em: 31 mar. 2026.

SARAIVA, S. V.; CARVALHO, F. D. O.; SANTOS, C. A. G.; BARRETO, L. C.; FREIRE, P. K. D. M. M. Daily streamflow forecasting in Sobradinho Reservoir using machine learning models coupled with wavelet transform and bootstrapping. *Applied Soft Computing*, [S.l.], v. 102, 107081, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107081. Acesso em: 10 abr. 2026.

SOARES FILHO, Welson de Avelar. *Aprendizado de máquina com variáveis categóricas para previsão de vazão em bacias hidrográficas de Minas Gerais*. 2024. 161 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Exatas, Engenharia, Juiz de Fora, 2024.

VILANOVA, R. S.; ZANETTI, S. S.; CECÍLIO, R. A. Artificial neural networks-based model parameter transfer in streamflow simulation of Brazilian Atlantic Rainforest watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, [S.l.], v. 25, n. 7, 2020. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001947. Acesso em: 10 abr. 2026.

AGRUPAMENTO VISUAL AUTOMÁTICO DE IMAGENS DE AGREGADOS DE SOLO POR APRENDIZADO DE MÁQUINA NÃO SUPERVISIONADO

1 Claudia Liliana Gutierrez Rosas, 2 Admilson Irio Ribeiro
1Unesp- Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (ICTS), e-mail: claudia.gutierrez-rosas@unesp.br ; 2 Unesp- Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (ICTS), e-mail: admilson.irio@unesp.br

Palavras-chave: agregados de solo; K-Means; análise de imagens.

Resumo

A classificação automatizada de frações granulométricas de agregados de solo a partir de imagens digitais tem potencial para acelerar a análise da estrutura do solo em larga escala. Este trabalho propõe um pipeline computacional que agrupa automaticamente 499 imagens de agregados de solo, capturadas por microscopia digital DinoCapture 3.0, sem que o computador precise saber previamente a qual classe cada imagem pertence**,** uma abordagem denominada aprendizado não supervisionado. O sistema extrai características visuais de cada imagem utilizando uma rede neural convolucional pré-treinada (MobileNetV2) combinada com descritores matemáticos de textura (GLCM e LBP), agrupa imagens visualmente semelhantes e avalia a qualidade dos grupos por quatro indicadores estatísticos. Testado com 2 a 5 grupos, o algoritmo identificou consistentemente dois grupos naturais (K = 2): macroagregados de maior e menor tamanho, com alta estabilidade estatística (coeficiente de variação de 2,2%). Embora quatro frações granulométricas sejam definidas inicialmente na captura das imagens, o sistema visual não conseguiu separá-las automaticamente sem rótulos, pois as diferenças visuais entre frações adjacentes são sutis e se apresentam como um gradiente contínuo. Este resultado constitui um achado científico relevante: demonstra que a etapa seguinte indispensável é o aprendizado supervisionado com imagens rotuladas por especialistas, e fornece um conjunto de dados curado e uma metodologia validada para essa finalidade.

Introdução

Os agregados do solo constituem unidades estruturais hierárquicas que controlam propriedades físicas fundamentais, como porosidade, retenção hídrica e resistência à erosão, influenciando diretamente processos biogeoquímicos e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Bronick; Lal, 2005; Rieke et al., 2022). A classificação granulométrica tradicional, baseada em peneiramento seco ou úmido, permite quantificar a distribuição do tamanho dos agregados por meio de índices como o diâmetro médio ponderado (MWD) e o diâmetro médio geométrico (GMD). No entanto, esses métodos apresentam limitações inerentes, incluindo sensibilidade à energia aplicada, ao regime de vibração e ao tempo de imersão, além da incapacidade de discriminar a variabilidade morfológica intraclasse, como textura superficial, contornos e padrões de empacotamento (Kemper; Rosenau, 1986; Chaves, 202**5**).

Nesse contexto, estudos recentes têm destacado a necessidade de abordagens digitais complementares, integrando técnicas de visão computacional para capturar assinaturas morfológicas em imagens de agregados do solo (Ribeiro et al., 2020**;** Azizi et al., 2020; Alirezazadeh et al., 2021; Rosas et al., 2022, Minasny, 2024).

Apesar dos avanços em abordagens supervisionadas, que dependem de conjuntos de dados previamente rotulados, permanece uma lacuna quanto à compreensão da estrutura intrínseca dos dados em ausência de rótulos, especialmente no que se refere à correspondência entre padrões visuais e classes granulométricas definidas por métodos físicos. Nesse sentido, técnicas de aprendizado não supervisionado oferecem um arcabouço exploratório relevante para investigar a organização latente dos dados em espaços de alta dimensionalidade (Jain, 2010). Entre essas técnicas, o algoritmo K-means (MacQueen, 1967) tem sido amplamente empregado devido à sua simplicidade computacional e interpretabilidade, particularmente quando combinado com representações profundas (embeddings) extraídas por CNNs e com métodos de redução de dimensionalidade, como a Análise de Componentes Principais (PCA) (Matte, 2019; Caron et al., 2018). No entanto, é importante reconhecer que o K-means assume estruturas de cluster aproximadamente esféricas e depende da definição prévia do número de grupos, o que pode limitar sua capacidade de capturar padrões complexos em dados heterogêneos.

Diante desse cenário, o presente estudo propõe uma abordagem baseada na extração de características visuais por meio de uma CNN pré-treinada, seguida da aplicação de técnicas de aprendizado não supervisionado para investigar a estrutura latente de imagens de agregados do solo. Diferentemente de abordagens supervisionadas, não são utilizados rótulos durante o processo de agrupamento, permitindo avaliar em que medida os padrões visuais intrínsecos aos dados refletem as frações granulométricas tradicionalmente definidas.

Assim, este trabalho tem como objetivo principal avaliar a correspondência entre os agrupamentos naturais obtidos a partir de representações visuais profundas e as classes granulométricas estabelecidas por métodos convencionais. Especificamente, busca-se responder às seguintes questões: (i) os agrupamentos obtidos por técnicas não supervisionadas são consistentes com as frações granulométricas definidas experimentalmente? (ii) qual é a estrutura latente predominante no espaço de características extraídas das imagens? e (iii) em que medida os resultados evidenciam a necessidade de abordagens supervisionadas para a classificação precisa de agregados do solo?

Material e Métodos

Obtenção e Conjunto de Imagens:

O processo de obtenção e classificação das imagens dos agregados do solo baseia-se no fracionamento granulométrico por peneiramento seco, onde amostras previamente limpas de fragmentos maiores que 6,3 mm são submetidas a uma vibração de 2400 vpm por 3 minutos (Chaves, 2025). Conforme demonstrado na Figura 1, o processo de fracionamento permitiu a separação visual e física dos agregados, evidenciando a transição de estruturas robustas na classe C1 (6,3–4,0 mm) até a alta densidade de agregados finos na classe C4 (1,0–0,5 mm).

Foram utilizadas 499 imagens digitais de agregados de solo capturadas com microscópio digital DinoCapture 3.0 utilizando um lightbox com iluminação LED difusa e fundo branco neutro. Também foram redimensionadas para 224 x 224 pixels para o processamento computacional.

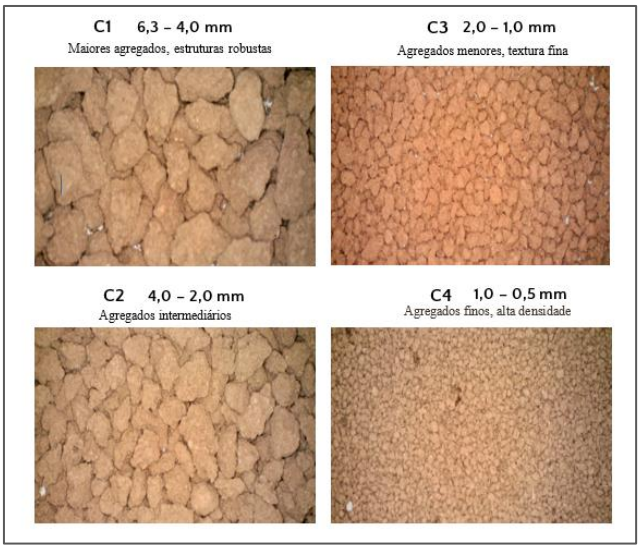


Figura 1: Representação visual das classes granulométricas de agregados do solo (C1 a C4) obtidas por peneiramento seco. Fonte: Elaboração própria (2026).

Extração de Características e Pré-processamento

Para viabilizar a comparação computacional entre as imagens, aplicou-se o processo de extração de features, utilizando duas abordagens complementares:

- Embeddings de CNN: Utilizou-se o modelo MobileNetV2, extraindo um vetor de 1.280 dimensões por imagem como uma "impressão digital visual". Os pesos foram mantidos congelados (pre-trained weights).
- Descritores de Textura (GLCM e LBP): Foram calculados 20 atributos matemáticos para quantificar a organização espacial dos pixels, capturando propriedades como contraste, homogeneidade e micropadrões locais.

Os vetores foram padronizados e combinados com pesos iguais (50% cada). Para otimização computacional, aplicou-se a Análise de Componentes Principais (PCA), reduzindo os dados para as 50 variáveis mais representativas, o que preservou 72,1% da variância original.

Agrupamento via K-Means e Validação Estatística

K-Means, foi usado para explorar a estrutura natural dos dados. Foram avaliadas configurações do algoritmo K-means considerando valores de K entre 2 e 5, intervalo definido com base nas quatro frações granulométricas estabelecidas, incluindo K=2 como limite inferior para detecção de estrutura mínima nos dados. Para cada valor de K, foram realizadas 10 inicializações independentes (n_init=10) com o método de inicialização k-means++, visando reduzir a sensibilidade às condições iniciais e melhorar a convergência. O número máximo de iterações foi fixado em 300 (max_iter=300), valor suficiente para garantir estabilidade dos resultados considerando o tamanho do conjunto de dados (N=499). Adicionalmente, adotou-se uma semente fixa (random_state=42) para assegurar a reprodutibilidade dos experimentos, utilizando-se o algoritmo clássico de Lloyd para atualização dos centróides, adequado à escala e complexidade do problema analisado.

A qualidade técnica dos agrupamentos foi validada por quatro métricas estatísticas:

- Inércia (SSE): Mede a coesão interna dos clusters.
- Silhouette Score: Avalia a sobreposição entre grupos (escala de -1 a 1).
- Índice Calinski-Harabász (CH): Razão entre dispersão entre grupos e interna.
- Índice Davies-Bouldin (DB): Indica a separação entre clusters vizinhos.

A estabilidade do modelo foi confirmada via bootstrap (10 repetições com 80% dos dados), apresentando um Coeficiente de Variação (CV) inferior a 10%. Todo o fluxo foi desenvolvido em ambiente Python utilizando as bibliotecas scikit-learn, TensorFlow e scikit-image.

A metodologia adotada o pipeline detalhado na Figura 2, iniciando com a aquisição padronizada de 499 imagens e progredindo para a extração híbrida de características (MobileNetV2 e descritores GLCM/LBP) antes do agrupamento final via algoritmo K-Means.

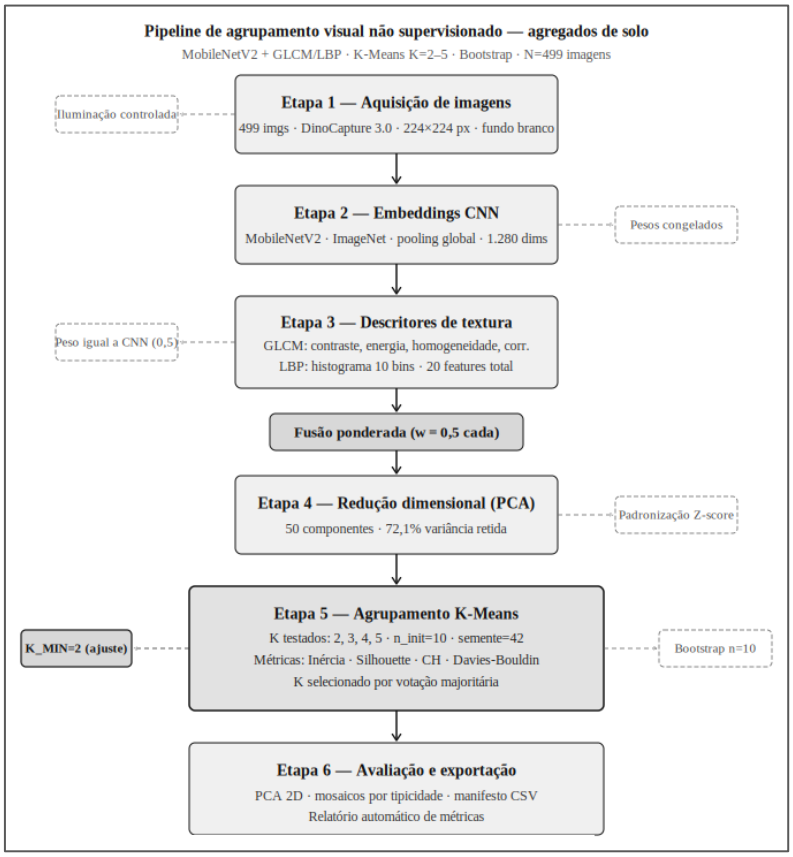


Figura 2: Pipeline do fluxo metodológico para o agrupamento visual não supervisionado de agregados de solo, integrando extração de *features* por CNN e descritores matemáticos de textura.
Fonte: Elaboração própria (2026).

Não foi aplicada normalização de iluminação adicional (CLAHE), pois as condições de captura foram padronizadas. Imagens com problemas de iluminação irregular foram identificadas na análise exploratória com K = 10 e deverão ser removidas na etapa supervisionada.

Resultados e Discussão

Indicadores Estatísticos

A Tabela 1 apresenta os valores dos quatro indicadores para K = 2 a K = 5. Três dos quatro indicadores apontaram K = 2 como número ideal de grupos: o Silhouette Score atingiu o valor máximo (0,172), o índice Calinski-Harabász foi mais alto (86,75) e a curva de inércia apresentou sua maior queda proporcional nesse ponto. O índice Davies-Bouldin apresentou valor ligeiramente menor em K = 5 (2,001), porém as diferenças entre K = 4 e K = 5 são pequenas e dentro da margem de variação estatística.Tabela 1. Métricas internas de avaliação do K-means para K = 2-5

Tabela 1 — Indicadores estatísticos de qualidade do agrupamento para K = 2 a K = 5 (N = 499 imagens).

K	Inércia (SSE)	Silhouette (média)	Calinski–Harabasz	Davies–Bouldin
2	99.537	0,172	86,75	2,143
3	90.036	0,155	74,63	2,120
4	83.921	0,159	66,67	2,035
5	79.800	0,162	62,83	2,001

O bootstrap para K = 2 resultou em Silhouette médio 0,175 ± 0,004 (CV = 2,2%), confirmando alta estabilidade e reprodutibilidade.

Evolução dos Indicadores por Número de Grupos

A Figura 3 apresenta graficamente a evolução dos quatro indicadores conforme K aumenta de 2 a 5. A inércia diminui continuamente comportamento esperado, pois mais grupos sempre reduzem as distâncias internas , com a maior queda proporcional em K = 5. O Silhouette Score atinge seu pico em K = 2 e decresce para K = 3, indicando que dois grupos capturam melhor a estrutura visual dominante. O índice Calinski-Harabász apresenta queda acentuada a partir de K = 2, evidenciando que grupos adicionais fragmentam estruturas visuais naturais, criando partições cada vez menos distintas. A linha pontilhada dourada marca K = 4 em todos os gráficos, o agrupamento esperado.

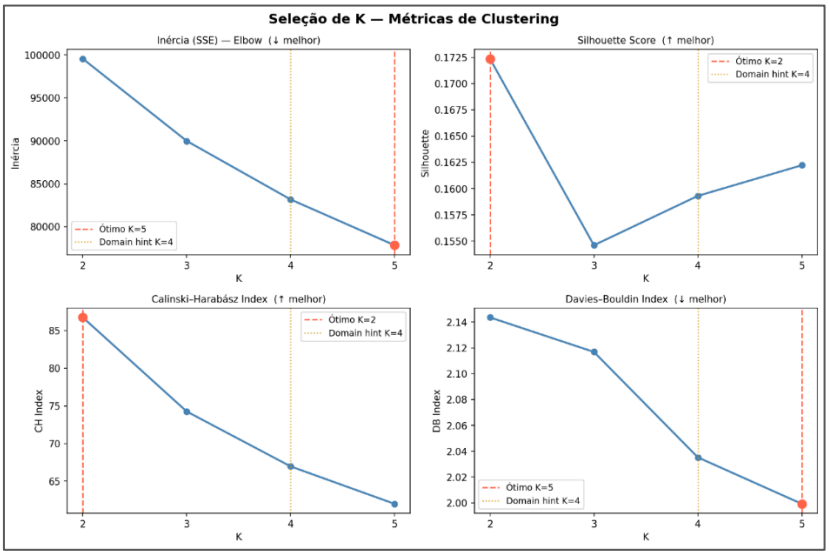


Figura 3: Evolução dos indicadores estatísticos de agrupamento para K = 2 a K = 5. A linha tracejada vermelha indica o K ótimo por cada indicador; a linha pontilhada dourada marca K = 4 (a esperada). Elaboração própria, (2026).

Distribuição Visual das Imagens

A Figura 4 apresenta a projeção em duas dimensões (PCA 2D) das 499 imagens, colorida por grupo para cada K testado. Cada ponto representa uma imagem; o símbolo X marca o centro (centróide) de cada grupo. A borda vermelha destaca K = 2, o resultado selecionado.

Observa-se que as imagens formam uma nuvem alongada e contínua, sem grupos claramente isolados. Em K = 2 (Silhouette = 0,172), o algoritmo divide essa nuvem em dois grupos distintos: um à esquerda, correspondente a imagens de textura fina (macroagregados menores), e outro à direita, com imagens de textura mais grossa (macroagregados maiores). À medida que K aumenta para 3, 4 e 5, o algoritmo realiza cortes adicionais sobre essa nuvem contínua, com fronteiras progressivamente menos nítidas refletido nos valores decrescentes do Silhouette (0,155 para K = 3; 0,159 para K = 4; 0,162 para K = 5). A continuidade da nuvem indica que, no espaço visual analisado, não existe uma separação clara entre as quatro frações granulométricas.

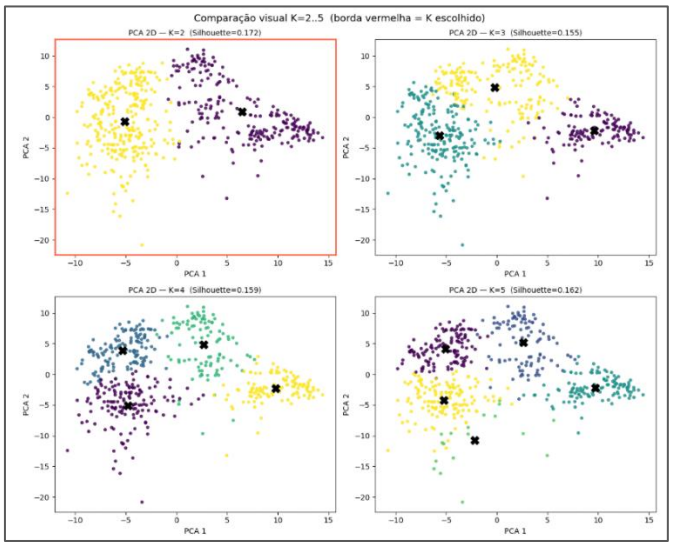


Figura 4: Representação bidimensional (PCA 2D) das 499 imagens de agregados de solo, colorida por grupo para K = 2, 3, 4 e 5. O símbolo X indica o centróide (centro) de cada grupo. A borda vermelha destaca K = 2, resultado selecionado pelos indicadores estatísticos. PCA 1 e PCA 2 representam os dois eixos de maior variação no conjunto de dados. Elaboração própria, (2026).

Inspeção Visual dos Grupos (Mosaicos)

A análise visual dos mosaicos de tipicidade permite interpretar as assinaturas morfológicas capturadas pelo algoritmo. É importante ressaltar que, como o fracionamento granulométrico deste estudo utilizou um limite inferior de 0,5 mm, todos os grupos identificados compõem a fração de macroagregados do solo (partículas > 0,25 mm). Assim, a separação realizada pela maquina foca na distinção entre diferentes escalas de macroagregados (dos mais robustos aos mais finos).

Para interpretar o significado de cada grupo, na Figura 5 se apresenta os mosaicos de pré-visualização foram analisados visualmente. Cada mosaico exibe as 16 imagens mais representativas do grupo, ordenadas da mais típica (mais próxima ao centróide) para a menos típica.

O cenário com K = 2 apresentou o maior rigor estatístico (Silhouette de 0,172), dividindo o conjunto de dados em dois grandes domínios morfológicos:

- Grupo 0 (N = 220 imagens): Reúne imagens com textura predominantemente fina e densa, com partículas de cor avermelhada a bege-alaranjada, sem espaços claramente visíveis entre si. Esse padrão é visualmente compatível com a faixa dos macroagregados menores (< 2 mm).
- Grupo 1 (N = 279 imagens): Concentra imagens com grânulos maiores e visivelmente individualizados, com espaços entre as partículas e maior variação de tom e forma. Esse padrão é compatível com as frações de maior tamanho (> 2 mm).

Embora os dois grupos não coincidam exatamente com as quatro frações do peneiramento, a separação capturada automaticamente é agronomicamente relevante: micro- e macroagregados diferem não apenas em tamanho, mas em composição, mecanismos de formação e papel no ciclo do carbono (SIX et al., 2000; Chaves, 2025).

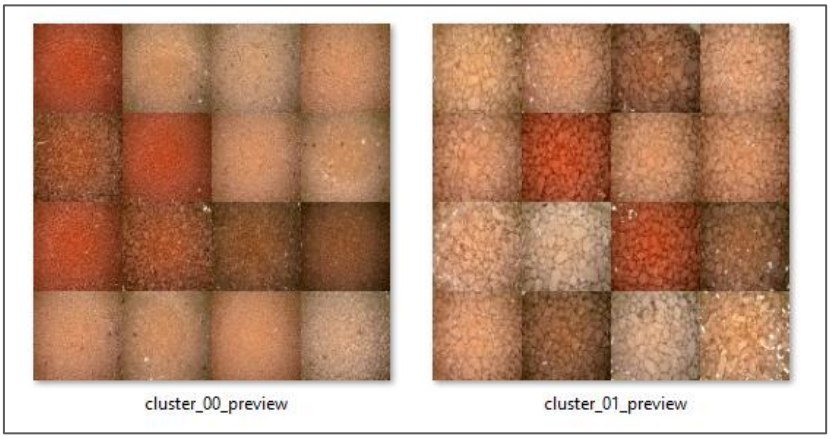


Figura 5 — Mosaicos de pré-visualização dos dois grupos identificados pelo algoritmo K-Means (K = 2). As 16 imagens mais representativas de cada grupo são exibidas em ordem de tipicidade (mais próximas ao centróide). Grupo 0 (esquerda): agregados — textura fina e densa. Grupo 1 (direita): agregados grânulos maiores e individualizados. Fonte: Elaboração própria, (2026).

Na Figura 6 se mostra o agrupamento automático de K=4 que gerou mosaicos representativos para cada cluster. Ao analisar o cenário de K=4, observa-se a formação de grupos que, embora sigam uma tendência de tamanho, apresentam uma confusão visual entre as classes granulométricas originais. Isso indica que o modelo está identificando características morfológicas (como rugosidade e forma) que transcendem a simples separação por diâmetro.

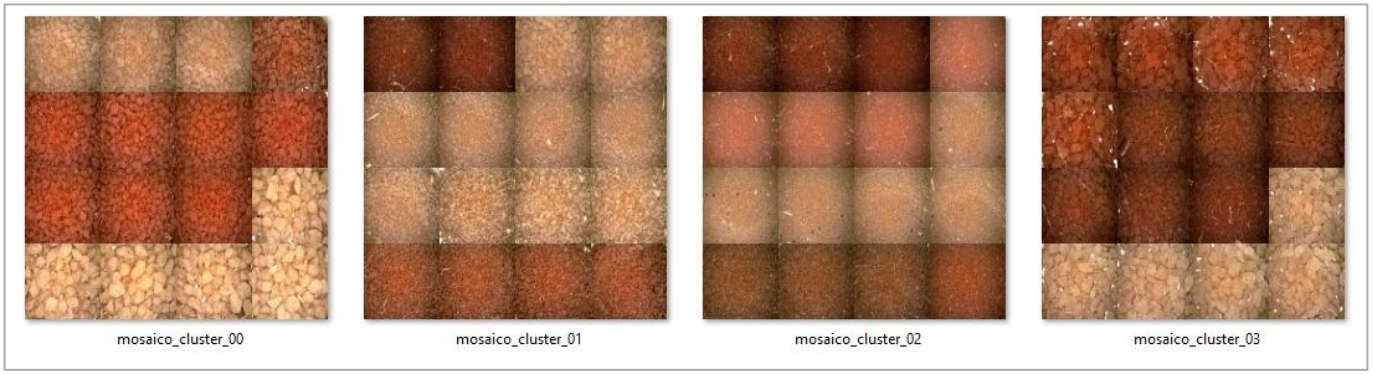


Figura 6: Mosaicos de tipicidade para o agrupamento com K=4, evidenciando a distribuição morfológica e as zonas de sobreposição entre as classes granulométricas.
Fonte: Elaboração própria, (2026).

Discussão Técnica e Implicações

É importante destacar que todas as 499 imagens deste estudo correspondem a macroagregados ou seja, estruturas com diâmetro superior a 0,25 mm. Os macroagregados são formados pela associação de partículas primárias, microagregados e matéria orgânica através de agentes biológicos como raízes e hifas de fungos (Tofanelli, 2021). Eles constituem a fração mais dinâmica e sensível ao manejo do solo: o preparo intensivo os destrói primeiro, enquanto práticas conservacionistas como o plantio direto favorecem sua formação e estabilidade (Loss, 2015).

A convergência do algoritmo para K = 2 não representa uma limitação metodológica, mas sim uma resposta fundamentada à estrutura intrínseca dos dados. Do ponto de vista computacional, a rede MobileNetV2 prioriza padrões de contraste, rugosidade e granularidade. A distinção entre superfícies de textura fina (macroagregados menores) e superfícies com grânulos grosseiros e individualizados (macroagregados maiores) é visualmente pronunciada, facilitando a segregação em dois domínios principais.

Embora o objetivo inicial fosse replicar as quatro frações físicas (C1 a C4), a análise sugere que a distinção entre faixas granulométricas adjacentes (ex: 1-2 mm vs. 2-4 mm) é sutil, formando um continuum visual onde as propriedades morfológicas se sobrepõem. O algoritmo, operando de forma não supervisionada, recuperou espontaneamente uma dicotomia que reflete diferenças funcionais e de composição já consagradas na literatura, separando os macroagregados em duas escalas de organização morfológica.

A inclusão de K = 4 como candidato na busca foi intencional e metodologicamente justificada. Em análise não supervisionada de dados com estrutura de domínio conhecida, é boa prática incluir o valor esperado pelo conhecimento especializado no intervalo de busca, permitindo que as métricas decidam de forma objetiva se esse valor corresponde ou não à estrutura visual dos dados (JAIN, 2010). A inspeção visual dos mosaicos para K=4 revelou uma sobreposição (confusão) entre as classes granulométricas físicas. Este fenômeno ocorre porque o K-Means agrupa as amostras com base na similaridade de textura e porosidade, atributos que nem sempre apresentam correlação linear estrita com o diâmetro obtido no peneiramento.

Estatisticamente, a dificuldade em isolar as quatro classes originais é corroborada pela redução nos índices de Silhouette e Calinski-Harabász em relação a K = 2. Contudo, a estabilidade do pipeline (CV = 2,2%) e a melhora no Índice Davies-Bouldin (2,035) para K=4 demonstram que o modelo identifica subgrupos matematicamente consistentes. Essa "confusão" visual sugere que o aprendizado supervisionado é indispensável para alinhar a percepção computacional às normas granulométricas humanas. O pipeline atual contribui com três funções preparatórias:

- Curadoria de Dados: A análise com K=10 permitiu identificar e excluir imagens com iluminação irregular ou contaminação por resíduos vegetais, garantindo a integridade do dataset.
- Validação de Extração: A consistência das features extraídas (CNN + GLCM/LBP) provou ser uma base sólida e reprodutível para futuros classificadores.
- Baseline de Separação: O Silhouette máximo de 0,172 estabelece uma linha de base para mensurar o ganho de acurácia com a introdução de rótulos de especialistas em arquiteturas como EfficientNetB0 ou ResNet50.

Limitações

Os valores de Silhouette obtidos (0,155 a 0,172) são considerados moderados. Tal comportamento é esperado em dados científicos de natureza contínua, onde as fronteiras entre classes não são discretas. Além disso, o tamanho do conjunto de dados (N=499) e variações residuais de iluminação podem ter limitado a captura de estruturas ainda mais finas, pontos que deverão ser otimizados em etapas subsequentes de treinamento profundo.

Oportunidades

Em termos práticos para o setor agrícola, a capacidade de agrupar agregados de solo de forma automática e visual abre caminho para sistemas de monitoramento em tempo real da saúde física do solo. A distinção clara entre agregados 'finos/densos' e 'grossos/individualizados' por meio de visão computacional pode ser integrada a máquinas agrícolas para ajustar a intensidade do preparo do solo ou a aplicação de corretivos, baseando-se no estado de agregação atual. Embora o modelo não substitua a precisão da peneiração manual para todas as frações, ele fornece um 'indicador morfológico' rápido que correlaciona a estrutura do solo com sua susceptibilidade à erosão e capacidade de retenção de água, permitindo uma gestão mais assertiva e menos invasiva.

Comentários finais

Este trabalho desenvolveu e validou um pipeline computacional para o agrupamento automático de imagens de agregados de solo via aprendizado de máquina não supervisionado. As principais conclusões e contribuições são:

- Identificação de Padrões Morfológicos: O algoritmo K-Means, utilizando features híbridas (CNN e descritores de textura), identificou dois grupos naturais com alta estabilidade estatística (CV = 2,2%). Esses grupos refletem a dicotomia entre diferentes escalas de macroagregados (maiores e menores que 2 mm), apresentando índices robustos de coesão (Silhouette = 0,172) e separação (CH = 86,75).
- Natureza Contínua dos Dados: A impossibilidade de recuperar automaticamente as quatro frações granulométricas (C1 a C4) sem rótulos revela que a transição morfológica entre classes físicas adjacentes ocorre como um gradiente contínuo. Este achado destaca que atributos visuais como porosidade e rugosidade transcendem a classificação puramente dimensional do peneiramento.

- Relevância Agronômica: A distinção capturada entre escalas de macroagregados é cientificamente relevante, pois reproduz diferenciações funcionais reconhecidas na literatura , sem a necessidade de intervenção humana prévia.
- Preparação para Modelos Supervisionados: O pipeline provou ser uma ferramenta eficaz de curadoria e controle de qualidade, identificando automaticamente falhas de iluminação ou contaminações. Os resultados estabelecem uma linha de base (baseline) validada para o treinamento de modelos supervisionados (como ResNet ou EfficientNet) focados na classificação granulométrica precisa.

O código-fonte e a metodologia desenvolvida são reprodutíveis e podem ser adaptados para a análise de outros solos ou materiais granulares, otimizando o fluxo de trabalho em laboratórios de física do solo.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a viabilização desta pesquisa. À Universidade Estadual Paulista (UNESP), pela infraestrutura e pelo apoio institucional disponibilizados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ALIREZAZADEH, P. et al. Estimating soil aggregate size distribution using deep learning and computer vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, [s. l.], v. 185, 2021.

AZIZI, A. et al. Classification of soil aggregates using deep learning and computer vision. *Soil and Tillage Research,* Amsterdam, v. 199, p. 104586, 2020.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, Amsterdam, v. 124, p. 3-22, 2005.

CARON, M. et al. Deep clustering for unsupervised learning of visual features. In: EUROPEAN CONFERENCE ON COMPUTER VISION (ECCV). *Proceedings*… [s. l.], 2018. p. 132-149

CHAVES, J. V. B. et al. Soil conservation and information technologies: A literature review. Smart Agricultural Technology, [s. l.], v. 11, p. 100935, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100935.

JAIN, A. K. Data clustering: 50 years beyond K-means. Pattern Recognition Letters, [s. l.], v. 31, p. 651-666, 2010.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (ed.). *Methods of Soil Analysis*. Part 1. Madison: ASA-SSSA, 1986.

LOSS, Arcângelo et al. Carbono orgânico total e agregação do solo em sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, p. 1212-1224, 2015.

MATTE, Marcelo Kuchar; NICOLETTI, M. C. Revisão de estratégias para a aceleração do algoritmo k-Means. In: Anais do Workshop em Computação da FACCAMP. 2019. p. 1-6.

MINASNY, B. et al. Soil science-informed machine learning. *Geoderma,* [s. l.], 2024.

RIEKE, E. L. et al. Evaluation of aggregate stability methods for soil health. *Geoderma*, Amsterdam, v. 428, p. 116156, 2022.

RIBEIRO, A. I. et al. Precision conservation: from visual analysis of soil aggregates to the use of neural networks. Revista Ciência Agronômica, [S.l.], v. 51, n. 5, p. e20200101, 2020. DOI: http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20200101

ROSAS, C. L. G. et al.. Morphometric classification of soil aggregates using deep learning within the concept of precision agriculture", *International Journal of Development Research*, *11*(09), 49932-49938, 2022.

SANDLER, M. et al. MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks. In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION (CVPR). Proceedings… [s. l.], 2018.

SIX, J. et al. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, Oxford, v. 32, p. 2099-2103, 2000.

TOFANELLI, Jaqueline Cardoso. O papel das raízes e dos microrganismos na estruturação de um solo em processo de recuperação. 2021.

O CONFLITO DA ARBORIZAÇÃO URBANA E REDES DE ENERGIA: O CASO DO DISTRITO DE JARDIM ÂNGELA, SÃO PAULO, SP

1 Frank Machado de Sousa, 2Tiago Böer Breier, 3 Flávio Pereira Telles, 4 Suzana Silveira de Almeida
1 UFRRJ, e-mail: Frank-rj@hotmail.com; 2 PGIFUR/UFRRJ, e-mail: tiagobreier@gmail.com; 3 PGIFUR/UFRRJ, e-mail: flaviotelles@gmail.com; 4 SEEDUC-RJ/FIOCRUZ-ENSP, e-mail:susanmeotti@yahoo.com.br

Palavras-chave: Arborização urbana; Redes de energia elétrica; Cidades sustentáveis.

Resumo

O crescimento urbano desordenado tem intensificado os conflitos entre a arborização urbana e as redes de distribuição de energia elétrica, especialmente em regiões periféricas. Este estudo analisou essa problemática no distrito do Jardim Ângela, zona sul da cidade de São Paulo, por meio de uma abordagem descritiva e exploratória, com métodos qualitativos e quantitativos. A pesquisa envolveu revisão bibliográfica e levantamento de campo de 200 árvores distribuídas em dez bairros do distrito. Foram analisados também os indicadores DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) do conjunto elétrico Monte Azul, os quais revelaram níveis superiores aos limites regulatórios da Aneel, evidenciando a baixa qualidade do fornecimento de energia na região. Além disso, ao comparar os conjuntos elétricos localizados em áreas periféricas com os das regiões centrais de São Paulo, observou-se que a distribuição de energia não ocorre de forma homogênea. Por fim, realizou-se a análise das causas de interrupção de energia elétrica no conjunto Monte Azul, que está inserido em sua maior parte no distrito do Jardim Ângela. Conclui-se que a ausência de planejamento urbano integrado, o plantio inadequado de espécies, a predominância de redes elétricas de menor confiabilidade e a falta de políticas públicas consistentes constituem os principais fatores agravantes do problema.

Introdução

A urbanização brasileira ocorreu de forma intensa e, em grande parte, sem o devido acompanhamento de políticas públicas capazes de ordenar o uso do solo. Esse processo tornou-se ainda mais evidente nas grandes metrópoles, onde o crescimento periférico concentrou problemas históricos: desigualdade socioespacial, precariedade dos serviços públicos e ocupação irregular do território. Em São Paulo, o distrito do Jardim Ângela exemplifica claramente essa realidade, pois sua formação urbana deu-se em meio à expansão desordenada da cidade, consolidando áreas com pouca infraestrutura e planejamento.

De acordo com Villaça (2012), a urbanização brasileira foi marcada pela desigualdade, concentrando infraestrutura e investimentos nas áreas centrais, enquanto as periferias cresciam de modo precário e sem planejamento. Essa leitura ajuda a compreender por que distritos periféricos como o Jardim Ângela reúnem conflitos urbanos complexos, nos quais diferentes infraestruturas urbanas (habitação, mobilidade, drenagem, arborização e redes elétricas) ocupam o mesmo território sem articulação adequada. Entre esses conflitos, destaca-se a relação entre arborização urbana e redes de distribuição de energia elétrica.

Conforme Maricato (2011), a ausência de planejamento urbano está entre as principais causas da formação de assentamentos informais, os quais frequentemente se consolidam sem infraestrutura adequada. Isso significa que o território é ocupado antes mesmo da definição técnica sobre calçadas, largura das vias, localização das redes elétricas e compatibilidade com a arborização. Nesse cenário, o plantio de árvores tende a ocorrer de forma espontânea, muitas vezes sem orientação especializada, ampliando as chances de conflitos futuros. No Jardim Ângela, esse quadro se agrava com ruas estreitas, redes expostas e carência de espaços públicos planejados: elementos que dificultam a convivência equilibrada entre vegetação e infraestrutura elétrica.

Apesar desses entraves, a arborização urbana possui importância inegável para a vida nas cidades. De acordo com Milano (1984), a vegetação urbana atua como regulador natural do clima, reduzindo os efeitos das ilhas de calor e promovendo maior conforto térmico à população. Corroborando essa ideia, Lombardo (1990) afirma que as árvores exercem função ecológica permanente ao interceptarem radiação solar, reterem partículas poluentes e favorecerem a infiltração da água no solo. Esses benefícios revelam que a discussão não deve ser conduzida no sentido de limitar a arborização, mas sim de qualificá-la por meio de planejamento, seleção adequada de espécies e integração com os demais componentes da infraestrutura urbana.

Entretanto, a prática mostra que a implantação da arborização em muitas cidades brasileiras ainda ocorre de forma empírica. Biondi (1987) afirma que as árvores são plantadas sem levar em consideração o meio urbano, o que leva à escolha equivocada de espécies, como aquelas posicionadas sob redes elétricas ou em calçadas estreitas. Conforme Sanchotene (1994), essa seleção inadequada compromete o desenvolvimento saudável das árvores e aumenta os riscos de acidentes, danos às calçadas e interferências com a fiação. Assim, o que deveria representar ganho ambiental e melhoria da paisagem urbana acaba exigindo intervenções corretivas constantes.

No que se refere especificamente à rede elétrica, o problema se intensifica porque grande parte das cidades brasileiras ainda utiliza sistemas aéreos convencionais. Segundo o Guia de Podas de Árvores Urbanas da Enel (2022), esse modelo apresenta maior suscetibilidade a falhas, sobretudo quando há contato entre galhos e cabos. Nessa condição, a arborização deixa de ser apenas um componente ambiental e passa a interferir diretamente nos indicadores de continuidade do fornecimento de energia. Além disso, conforme discutido neste estudo, áreas periféricas tendem a receber menos investimentos em modernização tecnológica, perpetuando estruturas mais vulneráveis e aumentando a frequência das interrupções.

Ademais, segundo Biondi (1996), a implantação das redes e o plantio das árvores costumam ocorrer de forma independente, sem critérios técnicos compatíveis. Milano e Dalcin (2000) ressaltam que a arborização urbana deve ser planejada considerando a estrutura e a altura das redes elétricas. Essas observações reforçam que o conflito entre árvores e fiação não decorre da existência da arborização em si, mas da ausência de articulação entre o planejamento ambiental e o planejamento da infraestrutura urbana. Por isso, compreender esse conflito no contexto do Jardim Ângela é fundamental para discutir soluções mais amplas, que envolvam manejo arbóreo, escolha de espécies, modernização das redes e políticas públicas integradas.

O presente artigo parte do entendimento de que o conflito entre arborização urbana e redes de energia elétrica é uma expressão concreta das contradições do crescimento urbano desordenado. Ao focalizar o distrito do Jardim Ângela, busca-se analisar como a precariedade do planejamento territorial influencia essa relação e de que maneira esse cenário afeta tanto a qualidade ambiental quanto a eficiência do fornecimento de energia. A pesquisa baseia-se em revisão bibliográfica, levantamento de campo, análise de indicadores de continuidade de energia (DEC e FEC) e exame das causas de interrupção associadas a "Árvores e Vegetação", apresentando uma metodologia estruturada em etapas interligadas. Trata-se, contudo, de uma discussão necessária, sobretudo porque pensar cidades mais sustentáveis exige reconhecer que arborização e infraestrutura não devem competir pelo espaço, mas coexistir de forma planejada, segura e socialmente justa.

Material e Métodos

A pesquisa analisa o conflito entre árvores urbanas e redes de distribuição de energia elétrica no distrito do Jardim Ângela, localizado na zona sul do município de São Paulo. De acordo com a Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP, 2022), o distrito possui aproximadamente 311 mil habitantes distribuídos em uma área de 37 km², o que corresponde a uma densidade de 78,02 habitantes/ha. A formação do Jardim Ângela foi marcada pelo crescimento desordenado, pela falta de planejamento e pela ausência do poder público na oferta de infraestrutura básica. A região tornou-se, contudo, destino para milhares de migrantes e trabalhadores de baixa renda em busca de moradia, formando dezenas de bairros irregulares caracterizados por moradias precárias e carência de serviços.

O conjunto Monte Azul é estruturado para atender a uma ampla área que abrange a maior parte do território do Jardim Ângela e, em menor proporção, os distritos vizinhos do Jardim São Luís e Capão Redondo. Com aproximadamente 153 mil unidades consumidoras registradas e composto predominantemente por sistema aéreo convencional, esse conjunto torna-se suscetível a interferências com a arborização. A sobreposição dos arquivos georreferenciados do Jardim Ângela com os limites operacionais do conjunto Monte Azul, realizada por meio do software QGIS, confirmou que a maior parte da rede elétrica desse conjunto está concentrada no distrito do Jardim Ângela. Essa correspondência espacial é um fator determinante para compreender os conflitos recorrentes entre arborização e energia elétrica observados nesta pesquisa, conforme ilustra a Figura 1, que mostra a área do conjunto Monte Azul.

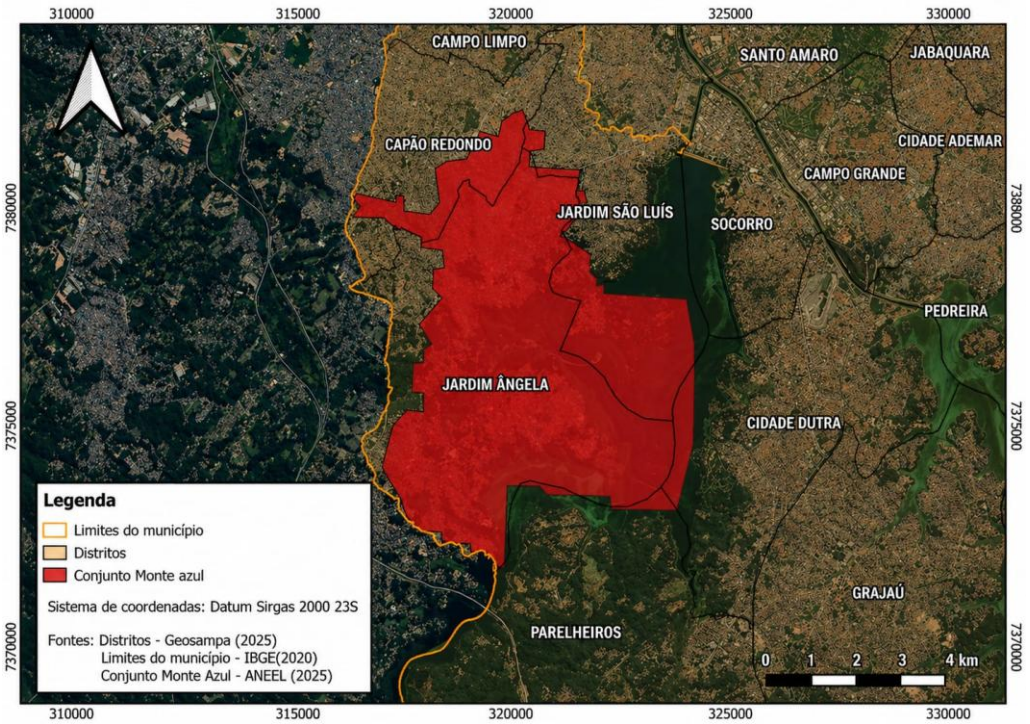


Figura 1: Área de atuação do conjunto Monte Azul.
Fonte: Autor (2025)

Na etapa seguinte, conduziu-se um levantamento de campo para caracterizar a arborização presente na área de estudo, adotando-se uma amostragem do tipo aleatório simples, a fim de assegurar a imparcialidade e a representatividade dos dados. Foram sorteados aleatoriamente dez bairros do distrito do Jardim Ângela entre os 86 existentes. Em cada bairro, sortearam-se quatro ruas e, nelas, analisaram-se as primeiras cinco árvores em um trecho de cem metros, totalizando 200 indivíduos avaliados. Durante o levantamento, coletaram-se informações relativas a variáveis dendrométricas e estruturais, incluindo espécie, altura aproximada, porte, diâmetro à altura do peito, presença de defeitos estruturais, grau de interferência com a rede elétrica, tipo de rede existente, compatibilidade com o passeio público e necessidade de manejo. Esses dados permitiram a construção de um diagnóstico detalhado sobre a situação da arborização urbana e sua interação com a infraestrutura elétrica.

Foram analisados, ainda, os indicadores de continuidade do fornecimento de energia elétrica (DEC e FEC) referentes ao conjunto elétrico Monte Azul, cuja área cobre, em quase sua totalidade, o distrito estudado. Esses indicadores foram utilizados para avaliar a qualidade do serviço prestado e identificar possíveis correlações entre as interrupções de energia e a presença de vegetação em conflito com a rede. Realizou-se também uma análise comparativa entre conjuntos elétricos inseridos em áreas periféricas e aqueles localizados em regiões mais planejadas do município, visando identificar diferenças nos níveis de continuidade do serviço. Além disso, examinaram-se as principais causas de interrupção no fornecimento de energia, com destaque para aquelas relacionadas à categoria “árvore e vegetação”, o que permitiu compreender o impacto direto da arborização sobre o desempenho do sistema elétrico.

Os dados obtidos foram organizados em tabelas e analisados de forma integrada, possibilitando a interpretação conjunta das informações ambientais e operacionais. Essa abordagem permitiu não apenas identificar os conflitos, mas também compreender suas causas estruturais, tais como falta de planejamento urbano integrado, escolha inadequada de espécies e limitação tecnológica das redes de distribuição. Dessa forma, a metodologia aplicada viabilizou uma análise ampla e consistente do problema, contribuindo para a compreensão da relação entre arborização urbana e infraestrutura elétrica em contextos de urbanização desordenada, além de fornecer subsídios para a proposição de estratégias de mitigação e para um planejamento urbano mais eficiente.

Resultados e Discussão

A análise do inventário de 200 árvores no distrito do Jardim Ângela revelou alta frequência da espécie Ficus benjamina (22,5% do total), o que indica um padrão de plantio que não considerou critérios técnicos relacionados ao porte das árvores e à compatibilidade com a infraestrutura existente. Cerca de 37% das árvores apresentavam conflito direto com a rede elétrica, e a espécie Ficus benjamina foi responsável por 19% desses conflitos, reforçando sua inadequação para áreas com redes aéreas.

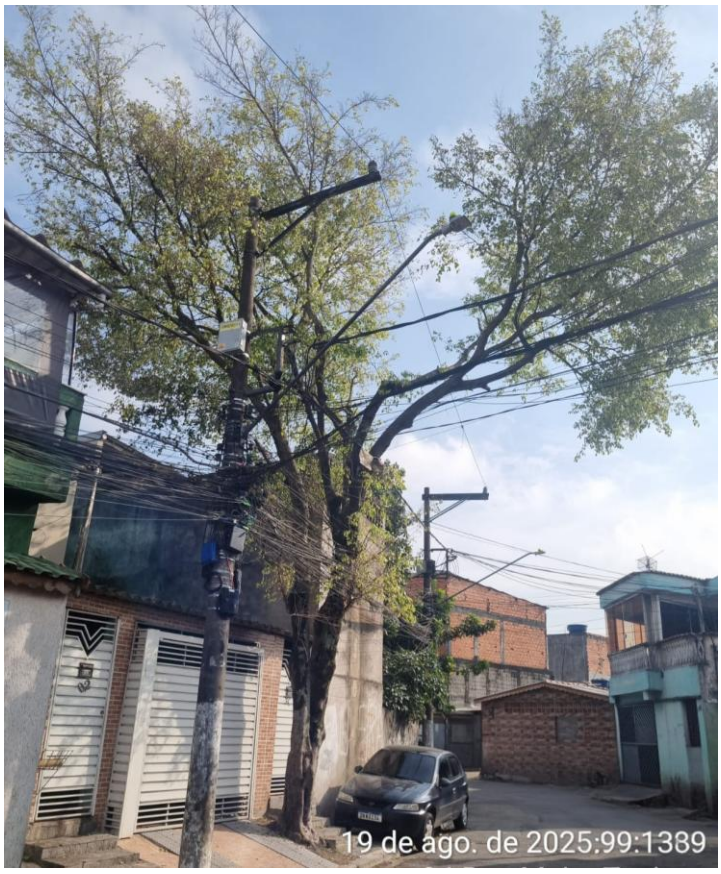
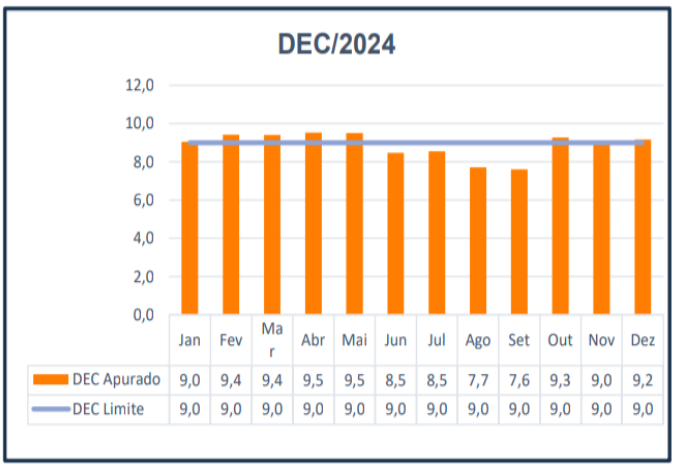


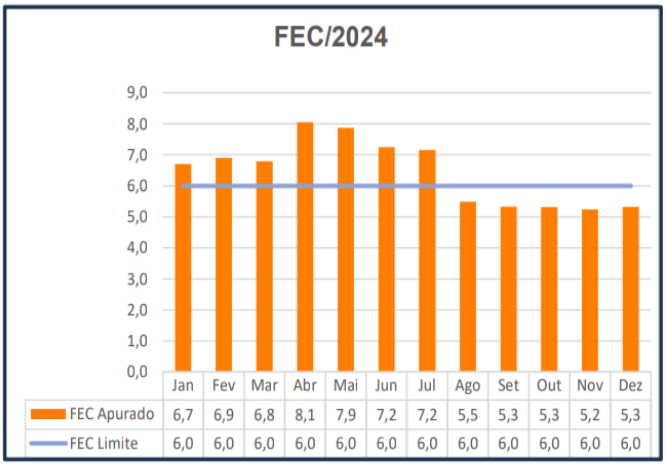
Figura 2: Ficus benjamina em conflito com a rede elétrica.
Fonte: Autor (2025)

A Figura 2 evidencia de forma clara o impacto negativo do conflito entre a arborização urbana e a rede de distribuição de energia elétrica, ao apresentar um exemplar de Ficus benjamina com interferência direta na fiação. Observa-se que o crescimento da árvore ocorreu em proximidade inadequada aos cabos elétricos, o que provavelmente levou à necessidade de poda direcional (popularmente chamada de "corte em V"), uma solução emergencial que elimina o conflito momentâneo com os fios, mas compromete a estética e a vitalidade da vegetação ao longo do prazo. Acrescenta-se a isso o fato de que quase nenhuma administração municipal ou concessionária de energia realiza a poda de formação da copa. Essa prática, quando executada, geralmente fica a cargo das concessionárias em árvores adultas, resultando frequentemente em copas de aspecto estético bastante desfavorável. Dessa forma, a figura reforça a importância do manejo adequado e da escolha correta de espécies para evitar conflitos que resultem tanto em danos à infraestrutura quanto na degradação da arborização urbana.

Também foi possível observar que os dez bairros analisados apresentam, em média, passeios com largura de 2,30 m, sendo que 49,5% das árvores estão em desacordo com as dimensões das calçadas. Em muitos casos, calçadas estreitas abrigavam espécies de grande porte, resultando em danos estruturais, como o levantamento do pavimento e a obstrução da circulação de pedestres. Esse cenário evidencia a falta de planejamento integrado entre arborização e infraestrutura urbana, contribuindo para o agravamento dos conflitos.

A avaliação dos indicadores de continuidade do fornecimento de energia elétrica revelou resultados preocupantes no conjunto elétrico Monte Azul. Os valores observados para o DEC e o FEC apresentaram níveis superiores aos limites estabelecidos pelos órgãos reguladores, indicando baixa qualidade do serviço prestado à população local. O DEC, que representa o tempo médio de interrupção do fornecimento de energia, apresentou, em determinados meses, valores apurados superiores ao limite, evidenciando que os consumidores permanecem por períodos prolongados sem energia elétrica. Já o FEC, que mede a frequência das interrupções, também registrou meses em que o valor apurado superou o limite, indicando que as falhas ocorrem com maior regularidade que o esperado. As Figuras 3 e 4 mostram detalhadamente o desempenho dos indicadores de continuidade de energia no conjunto Monte Azul no ano de 2024.



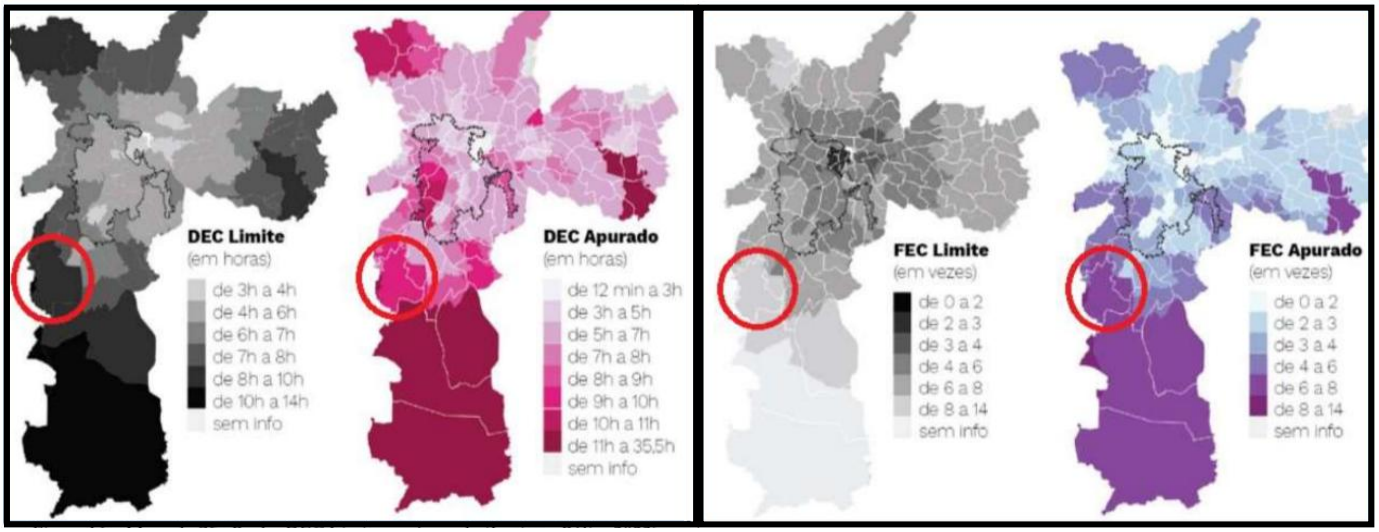


Figuras 3 e 4: Indicadores DEC e FEC: Limite vs. Apurado.
Fonte: BDGD ANEEL (2024)

Esses resultados refletem diretamente as condições da infraestrutura elétrica instalada na região, caracterizada pela predominância de redes aéreas convencionais. Esse tipo de rede, por possuir condutores expostos, apresenta maior vulnerabilidade ao contato com galhos e à ação de fatores externos, como vento e chuva. Consequentemente, a presença de arborização inadequada intensifica a ocorrência de falhas, afetando negativamente os indicadores de continuidade.

A comparação entre os indicadores de continuidade do conjunto elétrico Monte Azul e aqueles registrados em áreas mais centrais do município de São Paulo revela uma desigualdade significativa na qualidade do fornecimento de energia elétrica. Regiões periféricas, como o Jardim Ângela, apresentam índices mais elevados de interrupções (tanto em duração quanto em frequência) quando comparadas a distritos com melhor infraestrutura urbana.

Essa disparidade está diretamente relacionada ao histórico de ocupação do solo e ao nível de investimento em infraestrutura. Enquanto áreas centrais tendem a dispor de redes mais modernas, manutenção preventiva frequente e planejamento urbano estruturado, as regiões periféricas enfrentam limitações decorrentes da urbanização desordenada e da menor priorização nas políticas públicas.



Figuras 5 e 6: Mapa de São Paulo: DEC e FEC – Limite vs. Apurado.
Fonte: Instituto Pólis (2024)

As Figuras 5 e 6 apresentam a distribuição espacial dos indicadores DEC e FEC no município de São Paulo, permitindo identificar diferenças entre regiões. Observa-se que áreas periféricas, como o Jardim Ângela (destacado em vermelho nas figuras), concentram os maiores valores, evidenciando desigualdade na qualidade do fornecimento de energia elétrica entre os distritos. Essa análise revela a relevante dimensão social do problema, demonstrando que a qualidade dos serviços urbanos não é distribuída de maneira equitativa. A população residente em áreas periféricas é, portanto, mais impactada por falhas no fornecimento de energia, o que afeta diretamente sua qualidade de vida e o acesso a serviços essenciais.

A investigação das causas das interrupções de energia no conjunto elétrico Monte Azul revelou que a categoria "árvore e vegetação" responde por uma parcela significativa dos eventos. Em 2024, foram registradas 9.017 interrupções na região, das quais 549 (6,09%) tiveram como causa "Árvore ou Vegetação" (Figura 7). Esse resultado confirma a forte relação entre arborização urbana inadequada e o desempenho do sistema elétrico, uma vez que as interrupções ocorrem principalmente pelo contato direto de galhos com cabos elétricos em redes aéreas convencionais. Fatores como crescimento desordenado das copas, ausência de podas regulares e escolha inadequada de espécies contribuem para a intensificação desses eventos.

Além disso, condições climáticas atuam como elementos agravantes. Em períodos de chuva intensa e ventos fortes, árvores com defeitos estruturais ou com desenvolvimento inadequado tornam-se mais suscetíveis à queda, ocasionando interrupções no fornecimento de energia e, em alguns casos, danos à infraestrutura elétrica.

Outro aspecto observado é a predominância de ações corretivas em detrimento de medidas preventivas. A manutenção da arborização urbana, em muitos casos, ocorre apenas após a ocorrência de falhas, o que evidencia a ausência de um planejamento contínuo e sistemático. Essa abordagem reativa contribui para a repetição dos problemas e para o aumento dos custos operacionais.



Figura 7: Interrupções por detalhamento "Árvore ou Vegetação" – Conjunto Monte Azul.
Fonte: Abradee (2024)

Dessa forma, os resultados evidenciam que o conflito entre arborização urbana e redes de energia elétrica não pode ser tratado de forma isolada. Trata-se de um problema estrutural, que envolve planejamento urbano, gestão ambiental, escolha de espécies e modernização da infraestrutura elétrica. A superação desse cenário depende da adoção de estratégias integradas, capazes de alinhar desenvolvimento urbano, sustentabilidade ambiental e eficiência no fornecimento de energia.

Considerações Finais

A análise realizada ao longo deste estudo permitiu compreender que o conflito entre a arborização urbana e as redes de distribuição de energia elétrica no distrito do Jardim Ângela é resultado direto de um processo histórico marcado pela expansão urbana desordenada e pela ausência de planejamento integrado. A ocupação do território ocorreu sem a devida articulação entre infraestrutura, meio ambiente e uso do solo, o que favoreceu a sobreposição inadequada desses elementos e intensificou os problemas observados na atualidade.

Os dados obtidos no inventário arbóreo demonstraram elevada incidência de interferência entre árvores e rede elétrica, evidenciando que grande parte das espécies foi implantada sem critérios técnicos adequados. A predominância de árvores de grande porte em áreas com redes aéreas reforça a falta de planejamento no momento do plantio, resultando em conflitos recorrentes, necessidade constante de podas e aumento do risco de falhas no sistema elétrico. Essa realidade revela que a arborização, embora essencial para a qualidade ambiental urbana, pode se tornar um fator crítico quando não conduzida de forma

A avaliação dos indicadores de continuidade do fornecimento de energia elétrica mostrou que o conjunto Monte Azul apresenta valores superiores aos limites regulatórios, tanto em relação à duração quanto à frequência das interrupções. Esse cenário evidencia a fragilidade do sistema elétrico na região e confirma a influência direta da vegetação sobre o desempenho da rede. Ao mesmo tempo, os resultados revelam desigualdades significativas na qualidade do serviço, uma vez que áreas periféricas apresentam índices mais elevados de falhas quando comparadas a regiões mais estruturadas da cidade.

A predominância de redes aéreas convencionais também se mostrou um fator relevante para a intensificação dos conflitos. Esse tipo de infraestrutura, por possuir condutores expostos, apresenta maior suscetibilidade ao contato com galhos, principalmente em ambientes onde a arborização não foi planejada de forma compatível. A manutenção desse modelo em regiões periféricas evidencia a necessidade de investimentos em tecnologias mais seguras, capazes de reduzir a ocorrência de interrupções e melhorar a confiabilidade do fornecimento de energia.

A ausência de integração entre os setores responsáveis pela arborização urbana e pela distribuição de energia elétrica contribui para a permanência do problema. As ações realizadas tendem a ser corretivas e pontuais, sem abordar as causas estruturais que originam os conflitos. A falta de planejamento conjunto impede a adoção de soluções duradouras, mantendo um ciclo contínuo de intervenções emergenciais e aumento dos custos operacionais.

A participação da população também influencia diretamente esse cenário. Em muitos casos, o plantio de árvores ocorre de forma espontânea, sem orientação técnica, o que aumenta a probabilidade de escolha inadequada de espécies e de implantação em locais incompatíveis com a infraestrutura existente. A ausência de programas de educação ambiental dificulta a construção de uma consciência coletiva sobre a importância do planejamento da arborização urbana.

Diante desse contexto, torna-se evidente que a superação dos conflitos identificados depende de uma abordagem integrada e estratégica. A elaboração de planos diretores de arborização urbana, associada à modernização da rede elétrica e ao fortalecimento das políticas públicas, representa um caminho viável para reduzir os impactos observados. A escolha adequada de espécies, o manejo preventivo e a substituição gradual de infraestruturas mais vulneráveis são medidas fundamentais para promover maior equilíbrio entre a vegetação e o sistema elétrico.

A construção de cidades mais sustentáveis exige a compreensão de que a arborização urbana não deve ser tratada como um elemento isolado, mas como parte integrante da infraestrutura urbana. A convivência harmoniosa entre árvores e redes de energia depende de planejamento, investimento e gestão eficiente, capazes de garantir tanto a preservação ambiental quanto a qualidade dos serviços essenciais à população.

Comentários finais

O estudo evidenciou que a arborização urbana desempenha papel essencial na promoção da qualidade de vida nas cidades, ao mesmo tempo em que revela desafios significativos quando não há planejamento adequado para sua integração com a infraestrutura elétrica. Ficou claro que os conflitos observados são resultado, principalmente, da ausência de critérios técnicos no plantio e da falta de articulação entre políticas públicas e gestão urbana, o que compromete tanto a segurança da população quanto a eficiência dos serviços de energia.

Observou-se também que a adoção de estratégias baseadas em planejamento, escolha adequada de espécies e uso de redes modernas pode reduzir significativamente os impactos negativos dessa relação. A implementação de ações preventivas, aliada à realização de diagnósticos detalhados da arborização existente, permite uma gestão mais eficiente, evitando intervenções emergenciais e promovendo maior equilíbrio entre os elementos naturais e estruturais das cidades.

A construção de cidades mais sustentáveis depende não apenas de políticas públicas eficazes, mas também da conscientização da população quanto à importância do plantio adequado e do manejo correto das árvores. A integração entre poder público, concessionárias e sociedade é fundamental para garantir que a arborização urbana continue contribuindo para o bem-estar coletivo sem comprometer a segurança e a funcionalidade da infraestrutura urbana.

Agradecimentos

O Autor gostaria de agradecer a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e aos professores pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ABRADEE – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica. Sistema elétrico brasileiro. 2025.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Banco de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD)*. Brasília: ANEEL, 2024

BIONDI, Daniela. Arborização urbana: planejamento e manejo. Curitiba: UFPR, 1987.

BIONDI, Daniela. Arborização urbana no Brasil: aspectos técnicos e ambientais. Curitiba: UFPR, 1996.

INSTITUTO PÓLIS. *Desigualdades na qualidade de fornecimento de energia elétrica: análise dos indicadores de continuidade para o município de São Paulo*. 2024.

ENEL. Guia de podas de árvores urbanas. São Paulo, 2022.

LOMBARDO, M. A. Ilhas de calor nas metrópoles. São Paulo: Hucitec, 1990.

MARICATO, Ermínia. O impasse da política urbana no Brasil. Petrópolis: Vozes, 2011

MILANO, M. S. Arborização urbana. Porto Alegre: UFRGS, 1984.

MILANO, M. S.; DALCIN, E. Arborização urbana: técnicas de planejamento. Porto Alegre: UFRGS, 2000.

PMSP – Prefeitura do Município de São Paulo. Dados urbanísticos do distrito do Jardim Ângela. São Paulo, 2022.

SANCHOTENE, M. Arborização urbana: problemas e soluções. Porto Alegre: UFRGS, 1994.

VILLAÇA, Flávio José Magalhães. *Reflexões sobre as cidades brasileiras*. São Paulo: Studio Nobel.

FERRAMENTA BASEADA EM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA PREDIÇÃO DA POROSIDADE E SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE MEMBRANAS ELETROFIADAS NA FILTRAÇÃO DE AEROSSÓIS

1 Everton Rafael da Silva, 2 Otávio Ribeiro Moreira da Costa, 3 Ronaldo Bianchini da Silveira, 4 Sabrina Arcaro, 5 Murilo Daniel de Mello Innocentini, 6 Rachel Passos de Oliveira Santos

1 Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP), e-mail: everton.rsilva@sou.unaerp.br; 2 UNAERP, e-mail: otavio.costa@sou.unaerp.edu.br; 3 Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), e-mail: ronaldosilveirajm@gmail.com; 4 UNESC, e-mail: sarcaro@unesc.net; 5 UNAERP, e-mail: minnocentini@unaerp.br; 6 UNAERP, e-mail: rposantos@unaerp.br

Palavras-chave: Poluição atmosférica; Aprendizado de máquina; Caracterização de materiais.

Resumo

Os crescentes níveis de poluição atmosférica e a consequente preocupação com a qualidade do ar, principalmente em ambientes internos, têm impulsionado o desenvolvimento de dispositivos de proteção respiratória mais eficientes, como máscaras médicas e respiradores baseados em membranas poliméricas eletrofiadas. Estes materiais destacam-se por apresentarem elevado desempenho na filtração de aerossóis, valores adequados de queda de pressão e, em alguns casos, funcionalidades adicionais, como atividade antimicrobiana. No entanto, a avaliação experimental das propriedades essenciais para a aplicação dessas membranas eletrofiadas, especialmente as membranas compósitas, como sua porosidade, permeabilidade ao ar e propriedades de filtração, apresenta desafios significativos, como alto custo, elevado consumo de material e limitações associadas à deformabilidade desses materiais. Nesse contexto, o presente projeto propõe uma abordagem integrada baseada em inteligência artificial, combinando o processamento de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das membranas com a extração de seus descritores de textura, visando à predição de propriedades relevantes desses materiais por meio de um método mais eficiente, econômico e sustentável. Foram utilizadas imagens de MEV, parâmetros de eletrofiação e dados experimentais, como os de porosidade e espessura, de diferentes membranas compósitas baseadas em poliacrilonitrila (PAN) e celulose nanofibrilada (*cellulose nanofibrils*, CNF), PAN e nanocristais de celulose (*cellulose nanocrystals*, CNCs), assim como em policaprolactona (PCL) com nanopartículas de óxido de zinco (ZnO). As imagens foram submetidas à padronização geométrica e analisadas por meio da Matriz de Co-ocorrência de Níveis de Cinza (GLCM), da qual foram extraídos os descritores de *Haralick*. Esses parâmetros, combinados aos dados experimentais e de processamento, foram utilizados para treinar um modelo de Regressão Linear Múltipla para a predição da porosidade das membranas. O modelo preditivo implementado apresentou bom desempenho, com coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,90, indicando boa correlação entre os descritores extraídos e os valores experimentais de porosidade. Adicionalmente, foi desenvolvida uma ferramenta *web* em código aberto, baseada em *Application Programming Interfaces* (APIs) em *Python* (*FastAPI*), capaz de estimar a porosidade das membranas e simular seu desempenho na filtração de aerossóis. A ferramenta integrou um modelo de filtração de meios fibrosos, permitindo a determinação de parâmetros como os coeficientes de permeabilidade (k_1 e k_2), a eficiência de filtração por tamanho de partícula, *o Most Penetrating Particle Size* (MPPS), a queda de pressão (Δp) e o fator de qualidade (QF). Os resultados demonstraram que a abordagem proposta permite uma caracterização automatizada, rápida e de menor custo, minimizando a intervenção manual e aumentando a reprodutibilidade dos resultados em comparação com as técnicas experimentais já utilizadas. Portanto, o presente estudo contribui para o desenvolvimento de metodologias mais sustentáveis e eficientes para a avaliação de membranas eletrofiadas compósitas para aplicações, como camadas ativas de máscaras médicas/respiradores, além de apresentar potencial de aplicação como filtros em purificadores de ar/sistemas AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado), auxiliando no controle da poluição atmosférica.

Introdução

O processo de eletrofiação consiste na eletrificação de uma gota de solução polimérica para a geração de um jato que, após processos de estiramento/alongamento, com concomitante evaporação do solvente, leva à formação de fibras e consequentemente membranas fibrosas (Huang *et al.* 2024; Yu *et al.* 2024). Essas membranas eletrofiadas, devido à versatilidade de propriedades que podem ser facilmente ajustadas, como elevada porosidade, permeabilidade ao ar e elevada razão área superficial/volume, possuem diversas aplicações (Santos *et al.* 2025; Zheng *et al.* 2025). Por exemplo, elas podem ser utilizadas na área ambiental, no controle da poluição atmosférica (Wang *et al.* 2024; Yang *et al.* 2024; Liu *et al.* 2026), além de serem utilizadas como filtros em equipamentos de proteção individual (EPIs), como máscaras médicas e respiradores (Santos *et al.* 2022, 2023; Biswas *et al.* 2026).

Santos *et al.* (2023), em seu estudo, prepararam membranas eletrofiadas, baseadas em nanofibras/fibras ultrafinas de poliacrilonitrila (PAN)/celulose nanofibrilada (*cellulose nanofibrils*, CNF), para serem utilizadas como filtros de ar. Nesse estudo, as membranas produzidas apresentaram, em geral, baixos valores de queda de pressão (boa respirabilidade), eficiência de filtração (EF) de partículas de até aproximadamente 97%, com potencial para serem utilizadas como camadas ativas de máscaras médicas e respiradores.

De acordo com o processo de filtração de interesse, como no estudo de Santos *et al.* (2023), os parâmetros de permeabilidade ao ar, assim como a eficiência da coleta de partículas e resistência mecânica do meio filtrante devem ser

otimizados. A relação adequada entre permeabilidade ao ar e resistência mecânica do meio filtrante pode ser obtida por meio da combinação ideal entre o seu tamanho de poro e a sua porosidade (Salvini *et al.* 2002). No entanto, por exemplo, para determinar a porosidade dos materiais, propriedade essencial para sua utilização como filtro de ar, principalmente com relação às membranas eletrofiadas compósitas (materiais constituídos por mais de uma fase), as técnicas experimentais já utilizadas, como porosimetria por intrusão de mercúrio e, de forma indireta, a picnometria de hélio, podem ser de difícil aplicação. Isto deve-se principalmente ao fato de as membranas eletrofiadas deformarem-se facilmente, muitas vezes comprometendo a qualidade dos resultados de porosidade obtidos. Outra dificuldade, principalmente com relação à análise por picnometria de hélio, deve-se ao fato de as membranas possuírem uma baixa densidade (serem muito leves), necessitando-se, geralmente, de quantidade significativa desses materiais para o preenchimento até da menor célula de amostra do equipamento (Santos *et al.* 2023).

Na caracterização das membranas eletrofiadas para sua utilização como filtros de ar, não se pode deixar de considerar também o custo das análises, o tempo para a sua realização, o já mencionado elevado consumo de material envolvido e a dependência de recurso humano especializado para a sua realização. Como exemplo, podemos citar os testes para avaliação da permeabilidade ao ar dos materiais, dependente de recurso humano para sua realização, geralmente realizados no mínimo em triplicata ou ainda necessitando de mais amostras a serem analisadas, devido à facilidade de as membranas deformarem-se.

Algumas ferramentas de código aberto podem ser utilizadas para analisar as características das membranas eletrofiadas. Entre as mais utilizadas pela comunidade científica, destaca-se o *ImageJ*. O *ImageJ* é um software de código aberto, desenvolvido pelo *National Institutes of Health* (NIH), agência de pesquisas médicas que pertence ao Departamento de Saúde e Serviços Humanos dos E.U.A., e que tem como propósito geral ser uma ferramenta de processamento e análise de imagens de qualquer tipo de material, como as micrografias de membranas eletrofiadas obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Esse software não se limita a apenas um tipo exclusivo de aplicação, possui muitas variantes, como o *ImageJ2* e o *Fiji*, além de possuir mais de 500 *plugins* disponíveis, que podem ser utilizados para complementar suas funcionalidades e atender às necessidades específicas de cada usuário (Schneider *et al.* 2012). No contexto das membranas eletrofiadas, destaca-se o *plugin* GIFT (*General Image Fiber Tool*) do *ImageJ*, pois este fornece ao usuário ferramentas para calcular o diâmetro médio de suas fibras utilizando suas imagens de MEV. O *plugin* inicia-se com o processamento das imagens de MEV no formato de 8 bits, depois é aplicada a técnica Sobel para detecção de bordas nas fibras, seguida pela limiarização da imagem. Via rotação da imagem diversas vezes e aplicação de filtros, o *plugin* identifica e mede as distâncias entre as bordas das fibras e, com isso, o GIFT consegue determinar seus diâmetros. No entanto, faz-se necessário ressaltar que o método e seus resultados dependem do manuseio e interação por parte do usuário com o software, o que pode levar a resultados inconsistentes.

O *ImageJ* também permite a análise manual do diâmetro da fibra. No entanto, é necessário ressaltar que as técnicas de binarização e segmentação, assim como a obtenção do diâmetro das fibras, são processos que requerem intervenção manual do usuário para ajustar parâmetros, definir escalas/filtros e medir o diâmetro, o que pode introduzir variabilidade nos resultados dependendo da experiência/percepção do usuário. Ainda, o software, mesmo não possuindo capacidade nativa de prever a porosidade de membranas eletrofiadas e seus tamanhos de poro, pode ser utilizado para a determinação dessas propriedades via processamento das imagens de MEV dos materiais, o qual envolve o ajuste do *threshold*. Destaca-se que os valores obtidos de porosidade e tamanho de poro correspondem à imagem bidimensional de MEV da membrana que é processada pelo *ImageJ*, sem levar em consideração o aspecto tridimensional do material.

Assim, o presente projeto teve como motivação a tarefa, muitas vezes complexa, de caracterização de membranas eletrofiadas para controle da poluição atmosférica, principalmente as membranas compósitas, em relação a propriedades importantes para suas aplicações, como camadas ativas de máscaras médicas/respiradores ou filtros em purificadores de ar/sistemas AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado). Ainda, considerou também como fator importante a escassez de investigações para a solução dessa problemática. Portanto, o presente projeto teve como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta automática para a previsão da porosidade de membranas eletrofiadas compósitas, permeabilidade ao ar e propriedades de filtração de aerossóis, de fácil acesso a toda a comunidade científica interessada, utilizando apenas ferramentas de código aberto e levando em consideração não somente as imagens bidimensionais de MEV dos materiais, mas também seu aspecto tridimensional. A implementação dessa nova abordagem visou preencher uma lacuna importante na caracterização automática de membranas eletrofiadas, oferecendo uma solução que combinou precisão, reprodutibilidade e facilidade de uso. Ao automatizar o processo de análise e incorporar propriedades preditivas através do Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*, ML), espera-se reduzir significativamente o tempo, esforço, custo e quantidade de material necessários para a caracterização das membranas, além de fornecer resultados consistentes e confiáveis. Ainda, por ser de código aberto, a ferramenta poderá ser continuamente aprimorada pela comunidade científica, permitindo a incorporação de novos recursos (como *plugins*, por exemplo).

Material e Métodos

Foram utilizadas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de membranas eletrofiadas poliméricas compósitas [poliacrilonitrila (PAN)/celulose nanofibrilada (*cellulose nanofibrils*, CNF), PAN/nanocristais de celulose (*cellulose nanocrystals*, CNCs) e policaprolactona (PCL)/nanopartículas de óxido de zinco (ZnO)], previamente caracterizadas quanto à sua porosidade [conforme a caracterização descrita por Modolon *et al.* (2025)] e espessura. As imagens padronizadas de MEV foram pré-tratadas e os parâmetros de eletrofiação utilizados na produção das membranas (como a vazão da solução polimérica, voltagem, distância da ponta da agulha-coletor, composição, rotação e velocidade de translação da agulha), assim como suas diferentes composições e os dados experimentais de caracterização, como porosidade e espessura da membrana, foram organizados em uma estrutura tabular.

O método estatístico de matriz de co-ocorrência de níveis de cinza (GLCM) foi aplicado para extração de características texturais das imagens de MEV. Foi utilizada a biblioteca *Scikit-Image* do *Python* para obtenção da matriz de co-ocorrência e extração dos descritores de *Haralick*, quantificando as propriedades texturais de dissimilaridade, correlação, energia e homogeneidade. Essa análise de textura das membranas foi realizada com base no estudo de Facco *et al.* (2010).

Para a modelagem e o treinamento do algoritmo de regressão, implementou-se a regressão linear multivariada, utilizando a biblioteca *Scikit-Learn* do *Python*, no conjunto de dados composto pelos parâmetros de eletrofiação e descritores de *Haralick* (previamente obtidos a partir do processamento das micrografias). Os dados foram divididos em conjuntos de treinamento e teste, com validação cruzada, seguindo recomendações gerais para modelos de regressão linear múltipla aplicados a dados experimentais (França *et al.* 2021). O modelo treinado foi serializado em formatos *Pickle* e ONNX, juntamente com um arquivo de metadados que registrou a ordem e o tipo de cada *feature*, assegurando consistência na inferência, em linha com as boas práticas recentes de automação e *Machine Learning Operations* (MLOps) em análise de imagens e materiais (Gao 2022; Filatova *et al.* 2020; Kang *et al.* 2024). Finalmente, foram calculadas métricas de desempenho, como o erro quadrático médio (MSE) e o coeficiente de determinação (R^2), para avaliar a precisão do modelo preditivo proposto.

Para o desenvolvimento da ferramenta, a integração entre a aplicação *web* e os módulos de processamento em *Python* foi implementada por meio de duas *Application Programming Interfaces* (APIs) *REST* desenvolvidas com o *framework FastAPI*. O *pipeline* metodológico proposto integrou, de forma sequencial, a coleta e o pré-tratamento das imagens de MEV, a extração automática dos descritores de textura, a modelagem de regressão multivariada para predição da porosidade e a simulação do desempenho na filtração de aerossóis das membranas eletrofiadas em uma única ferramenta *web*.

Resultados e Discussão

Através dos descritores de *Haralick* foi possível expandir o conjunto de dados, inicialmente de 14 micrografias para 53 dados no formato tabular. Os dados obtidos após a expansão foram divididos em dados de "Treino" (42 dados; 79%) e de "Teste" (11 dados; 21%) para aplicação ao algoritmo de regressão. A Tabela 01 apresenta as métricas obtidas pelo algoritmo de regressão multivariada e a Fig. 01 mostra a relação entre a porosidade "real" (medida experimentalmente) e a predita.

Tabela 01: Métricas da regressão.

Métrica	Teste	Treino
R^2	0,91	0,94
MSE	2,29	1,46

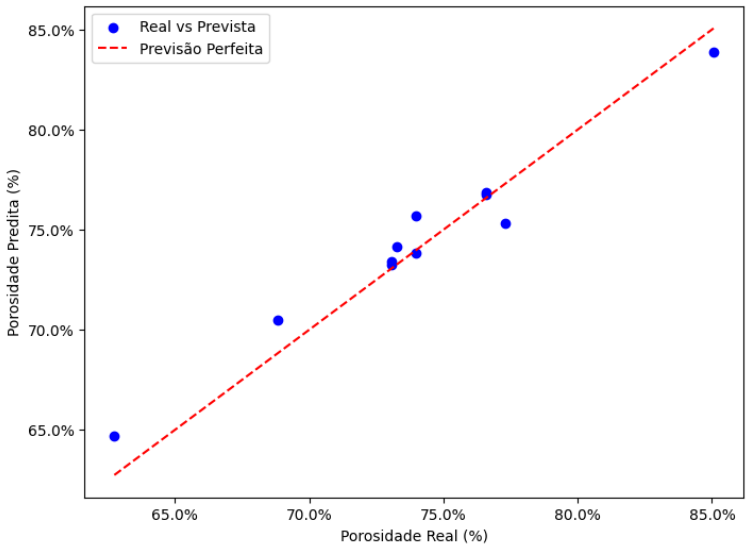


Figura 01: Gráfico de paridade das porosidades "reais" (obtidas experimentalmente) *vs.* preditas.

Observam-se nas métricas obtidas da Tabela 01 valores elevados de R^2, tanto para o conjunto de dados de "Teste", quanto para o de "Treino", indicando que o modelo preditivo explica bem a variabilidade dos dados. Na Fig. 01, o eixo "x" do gráfico representa os valores experimentais ("reais") de porosidade do conjunto de membranas eletrofiadas e o eixo "y" representa os valores previstos pelo modelo desenvolvido para a porosidade. Cada ponto azul no gráfico da Fig. 01 representa um par de valores, um valor real no eixo "x" e um valor predito no eixo "y". Ainda, na Fig. 01, a linha vermelha tracejada representa uma previsão "perfeita", mostrando que os pontos azuis se aproximam dela.

A Fig. 02 apresenta, de forma simplificada, a ferramenta desenvolvida, desde o *upload* da imagem pelo pesquisador até a obtenção da porosidade predita e dos parâmetros de desempenho na filtração de aerossóis das membranas eletrofiadas.

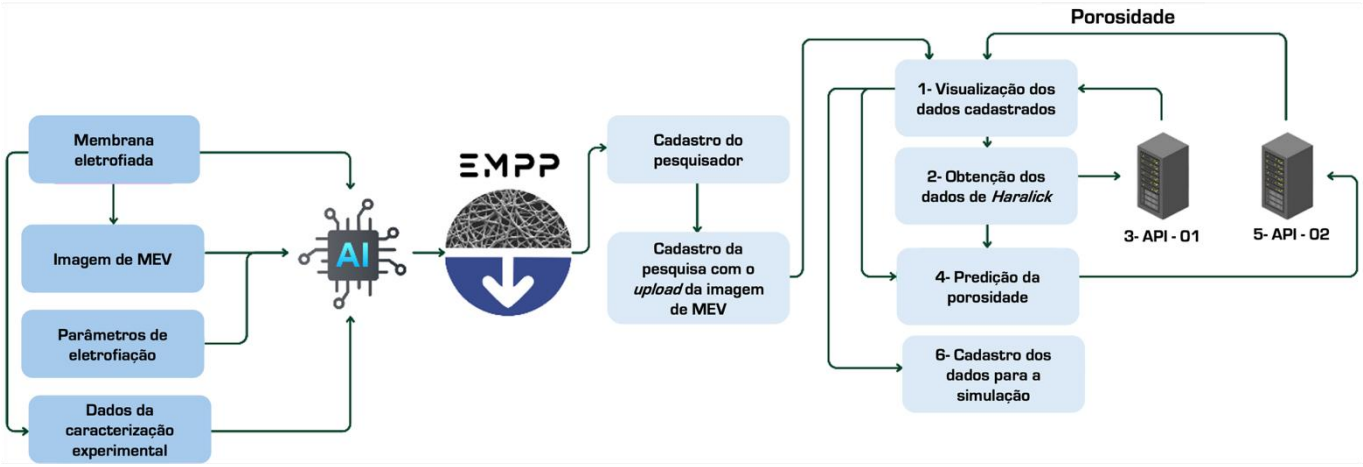


Figura 02: Esquema simplificado da ferramenta desenvolvida.

Na Fig. 02, observa-se que a primeira API recebe a URL de uma imagem de MEV, realiza o download, valida o arquivo e extrai automaticamente os descritores de *Haralick*. Em seguida, a segunda API recebe, em formato JSON, os parâmetros de eletrofiação juntamente com os descritores extraídos, compondo o vetor de entrada do modelo previamente treinado. Como saída, obtém-se a porosidade predita, que é armazenada e apresentada ao usuário por meio de uma interface desenvolvida em PHP e JavaScript. Essa integração entre processamento de imagens, extração de atributos e modelagem preditiva está alinhada às abordagens contemporâneas de uso de inteligência artificial para a caracterização automatizada de materiais (Gao 2022; Filatova *et al.* 2020).

Um modelo de simulação de filtração em meios fibrosos foi implementado na ferramenta e também está representado na Fig. 02. A partir de dados de entrada como a porosidade predita, a espessura da membrana e o diâmetro médio das fibras, o modelo calcula parâmetros geométricos e hidrodinâmicos, incluindo a densidade de empacotamento, os coeficientes de permeabilidade (k_1 e k_2) e as propriedades do fluido (densidade e viscosidade do ar). Em seguida, constrói-se uma distribuição granulométrica discreta em classes, o que permite estimar as eficiências elementares de captura por difusão, interceptação e impacto inercial. Essas contribuições são então combinadas para determinar a eficiência de coleta por classe de diâmetro de partícula e a eficiência de filtração total do sistema, bem como a queda de pressão (Δp), o fator de qualidade (QF) e a concentração de partículas a jusante. A equação de *Forchheimer* é empregada para descrever o escoamento em regime não-Darciano no meio poroso (Innocentini *et al.* 2012). A Fig. 03 apresenta a interface na qual é exibido o valor da porosidade predita das membranas pela API 02.

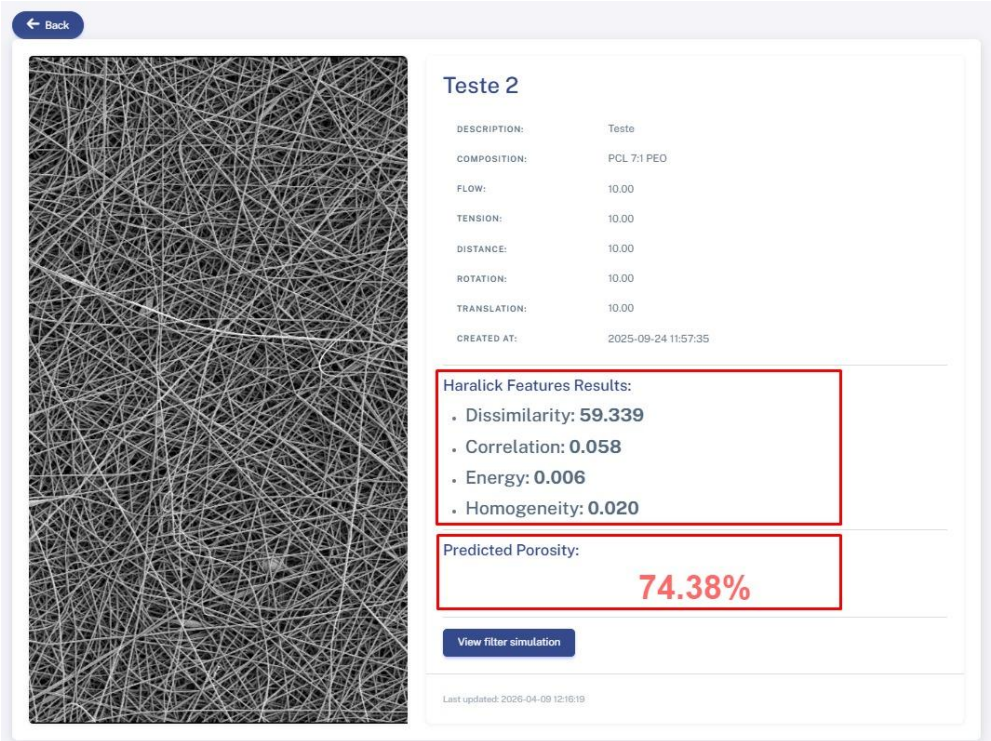


Figura 03: Interface com o valor de porosidade predita da membrana pela API 02.

A estrutura proposta da ferramenta permite, a partir da integração entre micrografias das membranas e parâmetros de eletrofiação, a obtenção de predições automatizadas de porosidade. Tais predições são, posteriormente, empregadas em um simulador de filtração, com o objetivo de estimar o desempenho dos materiais na filtração de aerossóis. Os resultados indicam que o uso de descritores de *Haralick* é adequado para a captura de características microestruturais correlacionadas com a porosidade e, consequentemente, com as propriedades de transporte em meios fibrosos. Ao incorporar informações texturais associadas à orientação, à distribuição espacial e ao grau de compactação das fibras, o modelo reduz sua dependência de métricas geométricas médias, passando a explorar de forma mais abrangente a variedade de informações contidas nas imagens de MEV. Essa abordagem mostra-se consistente com estratégias contemporâneas de caracterização automática de membranas eletrofiadas (Moor *et al.* 2025), contribuindo para uma análise mais robusta e representativa da estrutura e do desempenho funcional desses materiais.

Assim, o sistema da ferramenta integra, de forma transparente para o usuário, etapas que vão desde o pré-processamento da imagem e a extração dos descritores de *Haralick* (API 01) até a montagem do vetor de entrada, a consulta ao modelo de Regressão Linear Múltipla e o retorno da porosidade estimada (API 02). Em seguida, essa porosidade predita é reutilizada como parâmetro de entrada no módulo de simulação de filtração, fechando o ciclo entre microestrutura, predição de propriedades e desempenho funcional do meio fibroso. A interface da ferramenta permite acompanhar cada etapa do fluxo (cadastro, *upload* da imagem, extração dos parâmetros de *Haralick*, predição da porosidade e simulação da filtração de aerossóis), reforçando a transparência do processo e facilitando a sua adoção em pesquisas científicas.

Na ferramenta desenvolvida, a partir da distribuição granulométrica discreta e das equações implementadas, são obtidas as curvas de frequência em massa e de frequência acumulada em função do diâmetro de partícula, conforme apresentado na Fig. 04. Com base nessa distribuição, o simulador calcula, para cada classe de diâmetro, as eficiências de coleta fracionárias associadas aos mecanismos de difusão, interceptação e impacto inercial, combinando-as para determinar a eficiência total por classe e a eficiência global ponderada pela distribuição de massa. Adicionalmente, o sistema determina automaticamente o tamanho de partícula mais penetrante (*Most Penetrating Particle Size*, MPPS) e a correspondente eficiência mínima de filtração. A Δp é estimada por meio da Equação de Forchheimer, sendo decomposta em contribuições viscosa e inercial. Em testes preliminares com membranas de PAN/CNF, o simulador reproduziu adequadamente a ordem de grandeza das quedas de pressão e dos fatores de qualidade observados experimentalmente (Santos *et al.* 2022, 2023), além de gerar curvas de eficiência por classe de partícula e distribuições de carga consistentes com o comportamento esperado de filtros destinados à retenção de partículas submicrométricas.

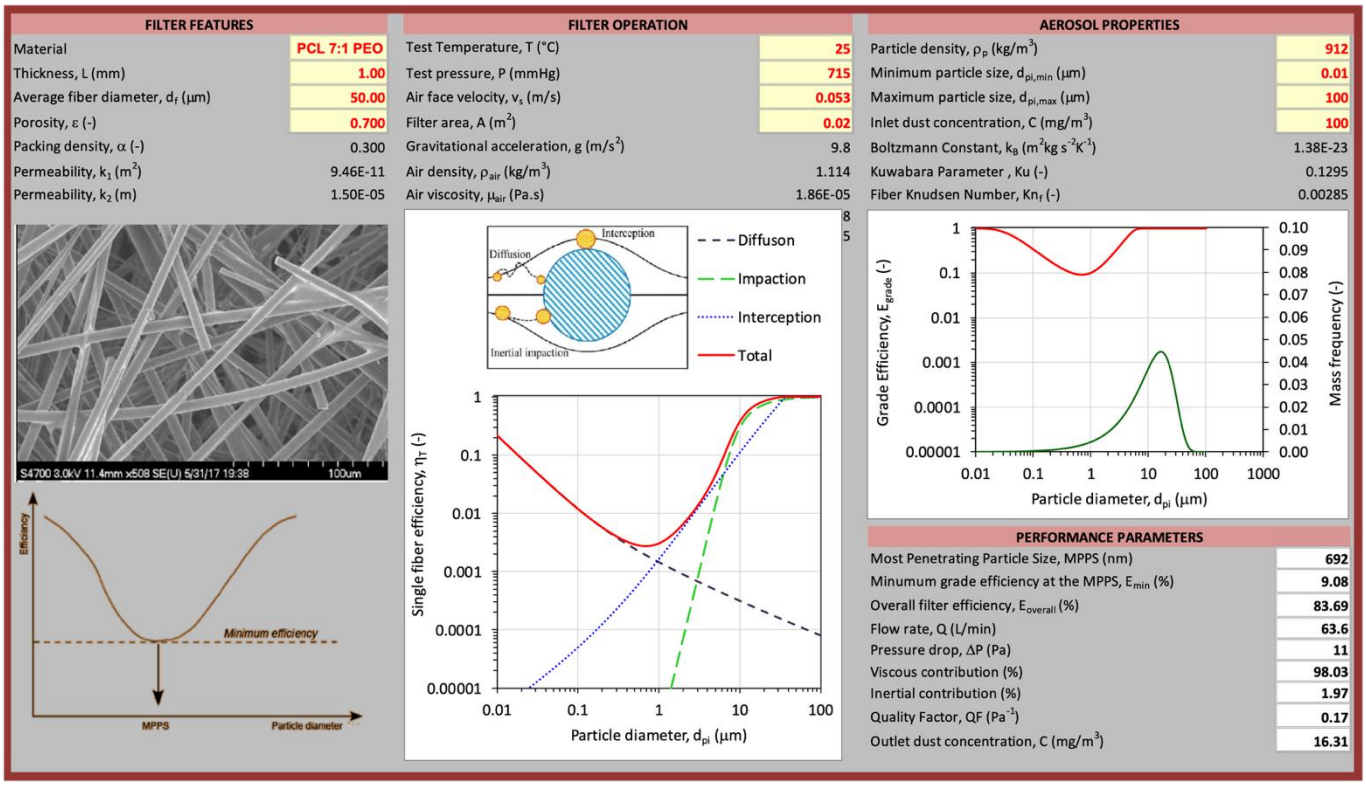


Figura 04: Parâmetros de desempenho do meio filtrante baseados nas características da membrana e do aerossol.

Embora os resultados apresentados ainda sejam preliminares, a ferramenta proposta é consistente com os dados experimentais dos materiais utilizados, cujas imagens e parâmetros de processamento serviram de base para o desenvolvimento do modelo (Santos *et al.* 2022, 2023). Assim, o sistema viabiliza a avaliação rápida de diferentes membranas compósitas, produzidas sob distintas condições de eletrofiação e submetidas a diversos cenários operacionais.

Considerações Finais

A integração entre o processamento automático de micrografias, a extração de descritores de textura, a regressão multivariada e a simulação de filtração em meios fibrosos mostrou-se uma estratégia sólida para a análise e o projeto de membranas eletrofiadas aplicadas à filtração de aerossóis. A ferramenta desenvolvida, ao incorporar a predição automatizada da porosidade em uma plataforma integrada, possibilita a obtenção rápida de parâmetros relevantes de desempenho de filtração, como eficiência de filtração, MPPS, Δp e QF. Essa abordagem reduz a dependência de procedimentos experimentais extensivos, diminuindo o consumo de materiais, o tempo de análise e os custos associados, ao mesmo tempo em que aumenta a reprodutibilidade e a padronização dos resultados. A interface simplificada e o fluxo automatizado favorecem a caracterização consistente das membranas, minimizando a intervenção do usuário. Além disso, trata-se de uma ferramenta de código aberto, de fácil acesso a toda a comunidade científica interessada, com uma arquitetura que permite sua evolução contínua, incluindo a incorporação de novos modelos de inteligência artificial, descritores morfológicos e módulos de simulação. Portanto, os resultados evidenciam o potencial da integração entre inteligência artificial e modelagem físico-computacional para o desenvolvimento de materiais filtrantes mais eficientes e sustentáveis. Tal abordagem contribui para a otimização de recursos e para o avanço de soluções tecnológicas voltadas ao controle da poluição atmosférica e à melhoria da qualidade do ar.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES (bolsa concedida ao E. R. S.), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (Processo nº 2025/15863-1 pela bolsa concedida ao O. R. M. C.) e à Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

BISWAS, Tulip; THAKUR, Bhavesh; KUMAR, Saurabh; KUMAR, Ajit; SHUKLA, Pushpendra Kumar; SINHA-RAY, Sumit. Breathable and antibacterial ultra-low particulate air filters using porous nanofibres. *Separation and Purification Technology*, v. 394, p. 137629, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2026.137629

FACCO, Pierantonio; TOMBA, Emanuele; ROSO, Martina; MODESTI, Michele; BEZZO, Fabrizio; BAROLO, Massimiliano. Automatic characterization of nanofiber assemblies by image texture análisis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v. 103, p. 66-75, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2010.05.018

FILATOVA, Darya; EL-NOUTY, Charles; PUNKO, Uladzislau. High-throughput deep learning algorithm for diagnosis and defects classification of waterproofing membranes. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering,* v. 16, n. 2, p. 26-38, 2020. DOI: 10.22337/2587-9618-2020-16-2-26-38

GAO, Erqian. Multiple Tools for Automated Nanofiber Characterization by Image Processing. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas em Engenharia Mecânica e Mecatrônica) - University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canadá, 2022.

HUANG, Jinhui; PANG, Haoliang; LIU, Zhexi; WANG, Xia; ZHANG, Chenyu; ZHANG, Wei; LIU, Si; HE, Wenjuan. Electrospinning biohybrid technology for wastewater treatment: principle, applications and perspectives. *Chemical Engineering Journal*, v. 491, p. 151971, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151971

INNOCENTINI, Murilo Daniel de Mello; TANABE, Eduardo Hiromitsu; AGUIAR, Monica Lopes; Coury, José Renato. Filtration of gases at high pressures: Permeation behavior of fiber-based media used for natural gas cleaning. *Chemical Engineering Science*, v. 74, p. 38-48, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.01.050

KANG, Dong Hee; KIM, Na Kyong; LEE, Wonoh; KANG, Hyun Wook. Geometric feature extraction in nanofiber membrane image based on convolution neural network for surface roughness prediction. *Heliyon*, v. 10, n. 15, p. e35358, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35358

MODOLON, Henrique Borba; TEIXEIRA, Luyza Bortolotto; MAZUR, Luciana Prazeres; SANTOS, Pedro Henrique; CAMANI, Paulo Henrique; MEI, Lucia Helena Innocentini; WERMUTH, Tiago Bender; MONTEDO, Oscar Rubem Klegues; ZIMMERMANN, Matheus V. G.; ARCARO, Sabrina; ROSA, Derval dos Santos. Electrospun adsorbent membrane of PLA containing chitosan for toxic metal ions removal from aqueous solution: Effect of chitosan incorporation. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 297, p. 139435, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.139435

MOOR, Marilin; MÄNNASTE, Laura; PUTRINŠ, Marta; FISHMAN, Dmytro; KOGERMANN, Karin. FiBar: A tool for analyzing fiber diameters in complex drug delivery systems from scanning electron microscopy images. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 212, p. 107179, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejps.2025.107179

SALVINI, Vânia Regina; INNOCENTINI, Murilo Daniel de Mello; PANDOLFELLI, Victor Carlos. Influence of ceramic processing on the mechanical resistance and permeability of filters in the Al2O3-SiC system. *Cerâmica*, v. 48, p. 121-125,

2002. DOI: https://doi.org/10.1590/S0366-69132002000300003

SANTOS, Rachel Passos de Oliveira; HAO, Junli; FROLLINI, Elisabete; SAVASTANO JUNIOR, Holmer; RUTLEDGE, Gregory Charles. Aerosol filtration performance of electrospun membranes comprising polyacrylonitrile and cellulose nanocrystals. Journal of Membrane Science, v. 650, p. 120392, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120392

SANTOS, Rachel Passos de Oliveira, HAO, Junli; INNOCENTINI, Murilo Daniel de Mello; FROLLINI, Elisabete; SAVASTANO JUNIOR, Holmer; RUTLEDGE, Gregory Charles. Composite electrospun membranes based on polyacrylonitrile and cellulose nanofibrils: Relevant properties for their use as active filter layers. *Separation and Purification Technology*, v. 311, p. 123358, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123358

SANTOS, Rachel Passos de Oliveira; FERRACINI, Thamiris Voltarelli; INNOCENTINI, Murilo Daniel de Mello; FROLLINI, Elisabete; SAVASTANO JUNIOR, Holmer. Composite electrospun membranes from cellulose nanocrystals, castor oil, and poly(ethylene terephthalate): Air permeability, thermal stability, and other relevant properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 287, p. 138437, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138437

SCHNEIDER, Caroline A.; RASBAND, Wayne S.; ELICEIRI, Kevin W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, v. 9, p. 671–675, 2012. DOI: https://doi.org/10.1038/nmeth.2089

WANG, Guangyao; FENG, Zhuoran; SUN, Lin; WANG, Miao; LI, Yulu; XIU, Lanling, FANG, Yueguang; YE, Junwei. Multi-functional nanofibrous membrane with antibacterial property for highly effective capture of PM0.3 and hydrogen sulfide. *Journal of Membrane Science*, v. 699, p. 122649, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.122649

YANG, Yuchen; WANG, Wenqing; ZHONG, Meiyan; GOU, Yukui; LU, Nan; CHENG, Yan; ZHU, Tianxue; HUANG, Jianying; CAI, Weilong; LAI, Yuekun. Sandwich-structured bimodal fiber/bead-on-string fiber composite membrane for comfortable $PM_{0.3}$ filter. *Chemical Engineering Journal*, v. 495, p. 153245, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153245

LIU, Yifang; WANG, Qibin; SHANGGUAN, Zihan; DENG, Changzhuo; YAN, Huangping; SHAO, Zungui; ZHENG, Gaofeng. Fully bio-based triboelectric bimodal nanofiber membrane for high-performance air filtration and respiratory monitoring. *Separation and Purification Technology*, v. 394, p. 137511, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2026.137511

ZICHEN, Yu; FAN, Tingting; LIU, Yang; LI, Lin; LIU, Jinhua; YANG, Bowen; RAMAKRISHNA, Seeram; LONG, Yun-Ze. Efficient air filtration through advanced electrospinning techniques in nanofibrous Materials: A review. *Separation and Purification Technology*, v. 349, p. 127773, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127773

ZHENG, Gaofeng; GUI, Zeqian; WANG, Qibin; CHEN, Ruixin; SHEN, Ruimin; GUO, Shumin; YAN, Huangping; LIU, Yifang; SHAO, Zungui. Green electrospinning fully bio-based lightweight nanofibrous membrane for high-performance and antibacterial air filtration via small molecule mutual support mechanism. *Journal of Cleaner Production*, v. 486, p. 144562, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144562.

ANÁLISE ESPACIAL E PREDITIVA DE COLISÕES ENTRE VEÍCULOS E FAUNA SILVESTRE NA BR-471, ESEC-TAIM

1 Maíte de Dineque Cassenote, 2 Guilherme da Rosa Froner, 3 Gabriel Gralow Rech, 4 Vitória Tesser Martin, 5 Luís Alvaro de Lima Silva, 6 Andressa De Oliveira Silveira, 7 Enio Júnior Seidel, 8 Rutineia Tassi

1 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: maite.cassenote@acad.ufsm.br; 2 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: guilherme.froner@acad.ufsm.br; 3 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: rech.gabriel@acad.ufsm.br, 4 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: vit.martin@acad.ufsm.br, 5 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: luisalvaro@inf.ufsm.br, 6 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail andressa.silveira@ufsm.br, 7 Universidade Federal do Amapá, e-mail: seidel_enio@unifap.br , 8 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: ruti@ufsm.br.

Palavras-chave: Aprendizado de máquina, Sustentabilidade, Fauna silvestre.

Resumo

As colisões entre veículos e fauna silvestre (CVFS) em rodovias constituem importante impacto da infraestrutura viária sobre a biodiversidade, especialmente em áreas de conservação, onde a sobreposição entre ambientes naturais e vias de circulação intensifica o contato entre fauna e tráfego. Este estudo analisou a ocorrência de CVFS com mamíferos na BR-471, em trecho de aproximadamente 16 km que atravessa a Estação Ecológica do Taim (ESEC-Taim), no sul do Brasil, considerando registros de capivara (*Hydrochoerus hydrochaeris*), ratão-do-banhado (*Myocastor coypus*), graxaim-do-campo (*Lycalopex gymnocercus*) e tatu-peba (*Euphractus sexcinctus*) entre 2010 e 2024. Inicialmente, foi aplicada a análise de densidade por Kernel para identificar hotspots de atropelamento ao longo da rodovia. Em seguida, empregou-se modelagem por *machine learning* para investigar se os padrões espaciais observados poderiam ser explicados por variáveis relacionadas à infraestrutura do Sistema de Proteção à Fauna, à quilometragem da rodovia, a fatores espaciais, temporais, de tráfego e a índices espectrais (LST, MNDWI, NDMI e NDVI). Os resultados indicaram que a quilometragem foi o preditor mais influente do modelo, evidenciando a existência de segmentos persistentemente mais críticos na BR-471. Além disso, LST, MNDWI, NDMI e NDVI, bem como suas métricas de variação temporal e defasagem, apresentaram elevada importância preditiva, sugerindo que a ocorrência de CVFS responde não apenas à localização ao longo da estrada, mas também à dinâmica de água, umidade, cobertura vegetal e condições ambientais antecedentes da paisagem. Esses achados reforçam que determinados trechos da rodovia funcionam como zonas recorrentes de travessia ou maior exposição da fauna, provavelmente em função da conectividade local e da interface entre áreas úmidas, campos abertos e infraestrutura viária. Assim, o estudo integra análise espacial e modelagem preditiva para subsidiar o entendimento dos fatores associados aos atropelamentos e o direcionamento de estratégias de mitigação em uma das áreas úmidas mais relevantes do sul do Brasil.

Introdução

As Colisões entre Veículos e Fauna Silvestre (CVFS) em rodovias constituem um dos impactos mais recorrentes da infraestrutura viária sobre a biodiversidade, atuando diretamente na mortalidade de animais e na fragmentação de hábitats (QUILES; BARRIENTOS, 2024; GELMI-CANDUSSO et al., 2025). Além disso, as rodovias comprometem o deslocamento funcional da fauna, alteram padrões de uso da paisagem, e intensificam conflitos entre a conservação das populações silvestres e a expansão da malha viária (WANG et al., 2023). Em áreas de conservação a presença de vias de circulação e ambientes naturais favorece o contato frequente entre veículos e animais silvestres (MULUALEM et al., 2023). Nesse contexto, mamíferos de médio e grande porte são a classe mais frequentemente atropelada, em parte por apresentarem hábitos predominantemente noturnos de deslocamento e alimentação (GUTEMA et al., 2023) Além disso, os registros de colisão de veículos com mamíferos de grande porte tendem a ser mais facilmente detectados em campo, quando comparados aos registros de vertebrados de pequeno porte, como anfíbios, o que também pode influenciar sua representatividade nos bancos de dados de monitoramento (BOYLE et al., 2025).

As CVFS envolvendo mamíferos de médio e grande porte expõem outro problema, pois podem representar risco significativo à integridade dos usuários das rodovias, ocasionando acidentes, danos materiais e, em casos mais graves, fatalidades humanas (RIBEIRO et al., 2025). Este estudo busca analisar a problemática de CVFS, com foco em mamíferos, na Estação Ecológica do Taim (ESEC-Taim), uma unidade de conservação situada entre os municípios de Rio Grande e Santa Vitória do Palmar, no Rio Grande do Sul, Brasil. A ESEC-Taim, abriga uma diversidade de espécies silvestre, entre elas a capivara (*Hydrochoerus hydrochaeris*), o ratão-do-banhado (*Myocastor coypus*), o graxaim-do-campo (*Lycalopex gymnocercus*) e o tatu-peba (*Euphractus sexcinctus*), todas sujeitas a colisões com veículos nessa região, uma vez que a unidade de conservação é cortada pela BR-471 em um trecho de aproximadamente 16 km de extensão (TASSI et al., 2023).

Entre as espécies consideradas neste estudo, a capivara se destaca pelo porte corporal, podendo atingir até 50 kg, o que potencializa a gravidade das colisões (MATA et al., 2025). Embora ratão-do-banhado, graxaim-do-campo e tatu-peba apresentem menor massa corporal, sua ocorrência frequente na ESEC-Taim e sobre a rodovia também contribui para o risco de acidentes e para a relevância ecológica desses eventos (BAGER; CASTRO, 2021; TASSI et al., 2023). Diante desse cenário, a identificação de hotspots de atropelamento constitui uma etapa essencial para compreender a distribuição espacial do problema e subsidiar medidas de mitigação mais eficientes (COYLE et al., 2026). No presente estudo, foi realizada a análise de hotspots por meio de densidade por Kernel para os registros acumulados de colisões nos 16 km da BR-471, no período entre 2010 e 2024. Os registros de colisões

foram organizados em contagens por mês, ano e quilômetro da rodovia, com o objetivo de mapear as áreas mais críticas e fornecer uma base empírica para análises posteriores projetos de mitigação de colisões, visto que a metodologia permite reconhecer trechos com maior concentração de registros, evidenciando padrões espaciais de recorrência ao longo da rodovia.

Entretanto, embora o mapeamento de densidade seja eficaz para revelar padrões espaciais, ele não explica, por si só, quais fatores da paisagem e da infraestrutura viária estão associados à formação desses hotspots. Por essa razão, este trabalho considerou também o emprego de *machine learning*, estruturado a partir da quilometragem da rodovia e da construção de variáveis relacionadas à infraestructura do Sistema de Proteção à Fauna, além de variáveis espaciais, temporais, de tráfego e índices espectrais.

Abordagens dessa natureza vêm sendo empregadas em estudos de ecologia de estradas para investigar fatores associados CVFS e para ampliar a capacidade preditiva das análises espaciais (JANGID et al., 2026). Dessa forma, busca-se verificar, de maneira analítica e preditiva, se os padrões de hotspots mapeados podem ser explicados pelas características do ambiente e da infraestrutura rodoviária. Assim, o artigo parte da hipótese de que a ocorrência de colisões entre veículos e mamíferos não se distribui aleatoriamente ao longo da rodovia, mas responde a uma combinação de fatores espaciais, estruturais e temporais. Ao integrar análise espacial e modelagem preditiva, o estudo pretende contribuir para o entendimento dos processos que condicionam os atropelamentos e para o planejamento de estratégias de manejo e mitigação em uma das áreas úmidas mais importantes do sul do Brasil.

Material e Métodos

Área de estudo

A área de estudo localiza-se na BR-471, em um trecho de aproximadamente 16 km de extensão, entre os quilômetros 523 e 540, situado entre os municípios de Rio Grande e Santa Vitória do Palmar, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Esse segmento rodoviário atravessa a ESEC-Taim, unidade de conservação federal com cerca de 32.797 hectares, criada para preservar banhados, lagoas, dunas, campos, matas e ecossistemas associados, reconhecidos por sua elevada importância ecológica (ICMBIO, 2021). A ESEC-Taim realiza o monitoramento das CVFS como parte das ações necessárias à gestão da unidade. Além disso, o trecho estudado conta com um sistema de proteção à fauna, composto por estruturas de mitigação implantadas ao longo da rodovia, com a finalidade de reduzir o risco de colisões e favorecer a conectividade da fauna entre os dois lados da paisagem fragmentada.

Bases de Dados Utilizadas na Elaboração de Hotspots de Colisão e Modelagem com *Machine Learning*

Registros de Colisões entre Veículos e Fauna Silvestre (CVFS)

Os dados de CVFS, foram obtidos através do monitoramento realizado por analistas ambientais da ESEC-Taim (ICMBIO, 2025), considerando o período de de abril de 2010 a outubro de 2024. O monitoramento foi conduzido ao longo de aproximadamente 16 km da BR-471, entre os quilômetros 523 e 540, por meio de vistorias realizadas em veículo a uma velocidade média de aproximadamente 30 km/h. Para este trabalho foram consideradas as colisões envolvendo quatro espécies de mamíferos, sendo a capivara (*Hydrochoerus hydrochaeris*), ratão-do banhado (*Myocastor coypus*), graxaim-do-campo (*Lycalopex gymnocercus*) e tatu-peba (*Euphractus sexcinctus*), totalizando 2.571 registros no período. As colisões com capivara correspondem a 92,14% das ocorrências e os 7,85% restantes distribuem-se entre as demais espécies. A inclusão do ratão-do banhado, graxaim-do-campo e tatu-peba buscou ampliar a representação dos mamíferos silvestres envolvidos nas colisões ao longo da rodovia, incorporando espécies relevantes tanto para a segurança viária quanto para a conservação da biodiversidade local.

Os registros de CVFS foram organizados por mês, ano e quilometragem da rodovia, de modo que a variável resposta correspondesse à contagem de colisões em cada marco quilométrico. Para a etapa de *machine learning*, adotou-se uma abordagem de classificação binária, distinguindo trechos de *alta* e *baixa colisão*. Sendo assim, as classes de *alta* e *baixa colisão*, foram definidas a partir do percentil 75 da distribuição de contagens de cada espécie, sendo classificados como *alta colisão* os valores acima desse limiar. Para avaliar se o limiar percentil 75 calculado sobre o dataset completo introduz vazamento no target, foi conduzida uma análise de sensibilidade comparando modelos treinados com limiares globais versus limiares recalculados exclusivamente sobre os dados de treino de cada partição temporal. As métricas foram idênticas (ΔAUC-ROC = 0,0000; ΔPR-AUC = 0,0000), indicando que o percentil 75 é estável entre as partições de dados e que sua definição global não constitui fonte de vazamento relevante no encoding do target. Esse critério foi utilizado para destacar os eventos mais intensos de colisão, concentrados na porção superior da distribuição, sem reduzir excessivamente o número de observações da classe minoritária.

Informações sobre o sistema de proteção à fauna (SPF)

As informações do sistema de proteção à fauna (SPF) foram obtidos a partir do inventário realizado pelo ICMBio (2025). No trecho analisado da BR-471, entre os quilômetros 523 e 540, foram registradas 16 passagens inferiores de fauna, do tipo túnel, distribuídas entre os quilômetros 524 e 540, no sentido norte–sul (Rio Grande–Santa Vitória do Palmar), com a função de permitir a travessia de animais entre os lados leste e oeste da paisagem fragmentada pela rodovia. Além disso, o sistema inclui telamento às margens da via, organizado em três segmentos: um trecho com tela entre os quilômetros 524 e 528, um trecho sem tela entre os quilômetros 528 e 533 e um novo trecho com tela entre os quilômetros 533 e 540. Também foram identificados quatro dispositivos do tipo mata-burro, estruturas metálicas instaladas ao nível do solo e compostas por barras espaçadas, localizadas nos intervalos 524–525, 527–528, 533–534 e 540–541. Para fins de modelagem, as variáveis referentes à *presença de túneis*, *telamento* e *mata-burro* foram organizadas em formato binário, considerando-se a presença ou ausência dessas estruturas em cada quilômetro da rodovia.

Variáveis espaciais, temporais e de tráfego

Foram incorporadas à análise informações de tráfego como velocidade regulamentada na rodovia, informações espaciais como a quilometragem, e informações temporais sazonais como as estações do ano. A velocidade regulamentada da rodovia, nos sentidos norte–sul e sul–norte, varia entre 30, 40 e 60 km/h e foi incorporada à modelagem de acordo com o valor correspondente a cada quilometragem. A quilometragem da rodovia também foi incluída como variável explicativa. Quanto à sazonalidade, foram consideradas as estações do ano, definidas como verão (janeiro a março), outono (abril a junho), inverno (julho a setembro) e primavera (outubro a dezembro), posteriormente convertidas em variáveis binárias (*Verão*, *Outono*, *Inverno* e *Primavera*). Além disso, os meses foram convertidos em funções seno (*Mês seno*) e cosseno (*Mês cosseno*), a fim de representar sua natureza cíclica e preservar a proximidade temporal entre meses consecutivos.

Variáveis derivadas de índices espectrais

Para a obtenção dos índices espectrais, foi desenvolvido um pipeline automatizado de extração na plataforma Google Earth Engine (GORELICK et al., 2017), utilizando imagens de refletância de superfície da série Landsat, Collection 2 Level 2, abrangendo as missões Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI e Landsat 9 OLI-2, disponibilizadas pelo U.S. Geological Survey (USGS), por meio do Earth Resources Observation and Science Center (EROS CENTER, 2020a, 2020b, 2020c).

Foi realizada harmonização das bandas espectrais entre sensores, de modo a garantir um processamento homogêneo. Todas as imagens foram pré-processadas com mascaramento de nuvens, sombras e pixels inválidos, com base na banda QA_PIXEL. Para cada combinação de mês e ano, foi gerada uma composição mediana mensal a partir da integração de imagens de múltiplos sensores, reduzindo ruídos e falhas em relação ao uso de uma única coleção.

Os índices calculados foram, LST (Land Surface Temperature, em °C) que mede a temperatura da superficie, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) que representa a condição da vegetação, MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) que destaca a presença de água superficial e NDMI (Normalized Difference Moisture Index) que mede a umidade da vegetação (BOTTARO et al., 2025; DAPKE et al., 2025). A extração foi realizada com resolução espacial nativa de 30 metros. Para cada ponto de monitoramento georreferenciado, foi criado um buffer circular de 1 km, dentro do qual foram calculadas a média, desvio padrão e delta de cada índice. A média foi utilizada para representar a condição ambiental predominante no entorno do ponto; o desvio padrão para expressar a heterogeneidade espacial desse entorno; e o delta, para indicar a variação temporal recente dos índices entre períodos consecutivos (ZHANG et al., 2018; ANDERLE et al., 2023).

Registros com cobertura insuficiente após o mascaramento de qualidade (1,7% dos grupos mensais) foram preenchidos por interpolação temporal pelo vizinho mais próximo dentro de cada quilômetro monitorado, garantindo integridade total do dataset.

Também foram consideradas as defasagens temporais dos índices ambientais, com o objetivo de representar efeitos não imediatos das condições da paisagem sobre a ocorrência de colisões, pois em sistemas ecológicos, a resposta da fauna ao ambiente nem sempre ocorre de forma instantânea, podendo refletir condições antecedentes de temperatura superficial, cobertura vegetal, disponibilidade de água e umidade da vegetação.

Assim, a inclusão da defasagem de um mês permitiu avaliar se mudanças ambientais observadas em períodos anteriores influenciam, com atraso, o uso do espaço, o deslocamento e a probabilidade de travessia da rodovia pelas espécies analisadas (ZHE; ZHANG, 2021; KUMAR et al., 2023). Sendo assim, cada índice recebeu o valor médio (MNDWI_mean, NDVI_mean, NDMI_mean e LST_mean), desvio padrão (MNDWI_std, NDVI_ std, NDMI_ std e LST_ std), delta (MNDWI_delta, NDVI_ delta, NDMI_ delta e LST_ delta) e de defasagem no tempo (MNDWI_lag, NDVI_lag, NDMI_lag e LST_lag). A seleção das variáveis espectrais temporais foi conduzida em uma análise empírica de importância por SHAP após um treino preliminar, na qual as variáveis com contribuição marginal próxima de zero foram removidas do conjunto final. Com base nesse critério, MNDWI_lag e NDMI_delta foram excluídos, pois sua informação temporal já estava capturada por preditores correlacionados presentes no modelo, sendo o MNDWI_delta e NDMI_lag.

Geração do Mapa de Densidade de Kernel para Identificação de Hotspots de CVFS

A análise espacial foi realizada no software QGIS 3.34.10, por meio da ferramenta *Mapa de Calor (Estimativa de Densidade de Kernel)*, com o objetivo de identificar os hotspots de CVFS ao longo da BR-471. A estimativa de densidade de Kernel tem sido amplamente utilizada em estudos de ecologia de estradas para identificar trechos com maior concentração de atropelamentos e subsidiar medidas de mitigação (LAUBE et al., 2023; KIBOBI et al., 2025). A camada de entrada utilizada na análise correspondeu à localização geográfica de cada quilômetro de interesse, abrangendo o trecho entre os quilômetros 523 e 540. Para cada quilômetro, foi considerada a contagem acumulada de CVFS registrada no período de abril de 2010 a outubro de 2024, permitindo a espacialização das áreas com maior concentração de ocorrências ao longo do trecho monitorado.

Modelagem por *Machine learning*

Como etapa complementar à análise espacial dos hotspots de CVFS identificados pelo mapa de densidade, foi empregada modelagem por *Machine Learning* (ML) com a finalidade de avaliar se os padrões espaciais observados ao longo da BR-471 poderiam ser explicados e preditos a partir de variáveis referentes a infraestructura do SPF, variáveis espaciais, temporais, de tráfego e índices espectrais. As análises foram realizadas em linguagem Python, utilizando os algoritmos Random Forest (RF) (BREIMAN, 2001) e XGBoost (XGB) (CHEN; GUESTRIN, 2016). Para este trabalho, adotou-se uma abordagem de classificação, na qual RF e XGB foram aplicados por serem algoritmos amplamente utilizados em problemas dessa natureza, especialmente em situações que envolvem relações não lineares entre variáveis explicativas e a variável resposta (SANA et al., 2023). A otimização de

hiperparâmetros dos modelos RF e XGB foi realizada com a biblioteca Optuna (AKIBA et al, 2019). Considerando o desbalanceamento entre as classes de *alta colisão* e *baixa colisão*, a métrica empregada no processo de otimização foi a area under the precision-recall curve (AUC-PR), por ser mais informativa em cenários com classes desbalanceadas (SOFAER; HOETING; JARNEVICH, 2019). Além disso, foi aplicada a técnica SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) para o balanceamento da classe minoritária no treinamento dos modelos (ELREEDY; ATIYA, 2019). Após o treinamento, foi realizado o ajuste do limiar de decisão dos classificadores. Em modelos de classificação binária, o valor padrão de 0,5 é comumente utilizado para definir a atribuição de uma observação à classe positiva ou negativa. Neste estudo, porém, diferentes valores de corte foram testados, sendo selecionado aquele que maximizou o F1-score da classe de alta colisão. Essa estratégia foi adotada para melhorar o equilíbrio entre precisão e revocação na identificação dos trechos mais críticos da rodovia, priorizando o desempenho da classe de maior interesse analítico. O desempenho dos modelos foi avaliado por meio das métricas PR-AUC, AUC-ROC, acurácia, precisão, revocação e F1-score, com ênfase nos resultados da classe de alta colisão. Como avaliação complementar da coerência espacial das predições, foi calculada a correlação de Pearson entre os valores médios preditos e observados por quilômetro. Adicionalmente, a importância das variáveis explicativas foi analisada por meio de SHAP (SHapley Additive exPlanations) (LUNDBERG; LEE, 2017) e permutation importance, permitindo identificar os principais atributos associados aos quilômetros com maior frequência de CVFS.

Resultados e Discussão

A análise de hotspots por estimativa de densidade de Kernel constitui uma abordagem recorrente em estudos de atropelamento de fauna silvestre, por possibilitar a delimitação espacial de segmentos críticos da rodovia com maior probabilidade de ocorrência de colisões (KIBOBI et al., 2025; JACKSON et al., 2026). No mapa de densidade de Kernel elaborado para a área em estudo (Figura 01), verifica-se que os maiores registros de colisões entre veículos e fauna silvestre, no período de 2010 a 2024, concentraram-se principalmente entre os quilômetros 524 e 533, com destaque também para o km 539. Em comparação, os quilômetros 534 a 538 e 540 apresentaram menor intensidade de colisões.

Complementarmente ao mapa de densidade, os resultados da modelagem por *machine learning* indicaram que o modelo XGBoost apresentou o melhor desempenho na análise principal, baseada na validação aleatoria (Tabela 01). Embora os modelos tenham sido construídos para classificar simultaneamente trechos de baixa e alta colisão, este estudo discutiu os resultados com ênfase na classe de *alta colisão*, por representar a categoria de maior relevância para a identificação de hotspots e para o direcionamento da discussão.

Na validação aleatória, o modelo XGBoost alcançou AUC-ROC de 0,79, PR-AUC de 0,57 e acurácia de 0,82. Após o ajuste do limiar ótimo de classificação, o modelo XGBoost apresentou, para a classe de *alta colisão*, precisão de 0,57, *recall* de 0,48 e F1-score de 0,52. Além disso, o modelo XGBoost apresentou correlação de Pearson de 0,61 entre colisão predita e colisão observada por quilômetro, indicando boa correspondência espacial entre o padrão previsto e o padrão observado. Na mesma estratégia de validação, o modelo Random Forest alcançou AUC-ROC de 0,72, PR-AUC de 0,44, acurácia de 0,76, precisão de 0,44, *recall* de 0,57, F1-score de 0,50 e correlação de Pearson de 0,59. Esses resultados mostram que o modelo XGBoost superou o modelo Random Forest nas principais métricas discriminativas da análise principal. Na validação temporal, o modelo Random Forest apresentou o melhor desempenho relativo, sobretudo nas métricas associadas à identificação da classe de alta colisão, enquanto o modelo XGBoost manteve acurácia ligeiramente superior (Tabela 01). Em conjunto, esses resultados mostram que o XGBoost apresentou melhor desempenho na análise principal, enquanto o Random Forest se mostrou mais consistente quando avaliado em anos posteriores.

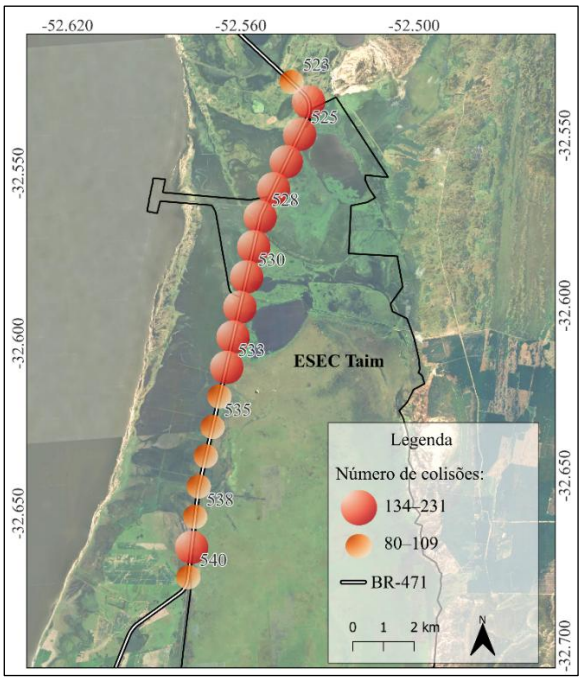


Figura 01: Hotspots de CVFS por quilômetro na BR-471, ESEC-Taim. Fonte: Autores (2026)

Validação aleatória							
Modelo	AUC-ROC	PR-AUC	Pearson r	Precisão	Recall	F1	Acurácia
XGBoost	0,79	0,57	0,61	0,57	0,48	0,52	0,82
RF	0,72	0,44	0,59	0,44	0,57	0,50	0,76
Validação Temporal							
Modelo	AUC-ROC	PR-AUC	Pearson r	Precisão	Recall	F1	Acurácia
XGBoost	0,72	0,48	0,41	0,46	0,55	0,50	0,77
RF	0,74	0,53	0,39	0,45	0,63	0,52	0,75

Tabela 01: Métricas de desempenho dos modelos XGBoost e Random Forest sob validação aleatória e validação temporal. Fonte: Autores (2026)

Considerando a interpretação por SHAP no modelo XGBoost (Figura 02), as variáveis que mais contribuíram para a predição de alta colisão foram a quilometragem (Km), o LST médio (LST_mean), o delta de LST (LST_delta), a velocidade no sentido sul–norte (Speed_SouthToNorth), o NDVI com desvio padrão (NDVI_std), o MNDWI com desvio padrão (MNDWI_std), o LST com defasagem (LST_lag), o MNDWI médio (MNDWI_mean) e o NDMI com desvio padrão (NDMI_std). Esses resultados reforçam que as CVFS não dependem apenas da localização ao longo da rodovia, mas também de condições ambientais antecedentes, da heterogeneidade da paisagem e de atributos da própria infraestrutura viária. A relevância de variáveis associadas à temperatura da superfície, à água, à umidade e à cobertura vegetal sugere que a dinâmica ambiental do entorno da estrada influencia a ocorrência de CVFS, o que é coerente com a presença de espécies semiaquáticas, como a capivara e o ratão-do-banhado (TASSI et al., 2023; DA SILVEIRA et al., 2024; VIVIANO et al., 2025), bem como de espécies que utilizam com maior frequência ambientes abertos e mosaicos antrópicos, como o graxaim-do-campo e o tatu-peba (RAMOS; ARAÚJO; MARINHO, 2025; ROMERO et al., 2025).

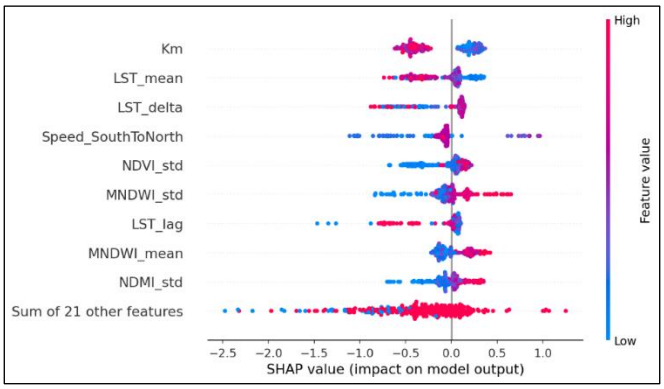


Figura 02: Contribuição das variáveis explicativas para a predição de alta colisão no modelo XGBoost, segundo os valores SHAP. Fonte: Autores (2026)

A presença de variáveis defasadas e de variação temporal, como LST_defasado, LST_delta e NDVI_delta, indica ainda que a CVFS pode responder não apenas ao estado ambiental imediato, mas também a condições antecedentes da paisagem, o que é compatível com deslocamentos influenciados por mudanças recentes na disponibilidade de água, na vegetação e no conforto térmico do ambiente (SHI et al., 2021; KURTH et al., 2024). A quilometragem foi o preditor mais influente tanto nas análises de importância quanto na interpretação por SHAP, o que é coerente com a existência de trechos persistentemente mais críticos ao longo da rodovia e vai ao encontro da análise de densidade por Kernel. Esse resultado sugere que determinados segmentos da BR-471 funcionam como zonas recorrentes de travessia ou de maior exposição da fauna, provavelmente em função da distribuição espacial de recursos, da conectividade local e da interface entre áreas úmidas, campos abertos e a própria infraestrutura viária.

Considerações Finais

Os resultados encontrados neste trabalho evidenciaram que as colisões entre veículos e fauna silvestre na BR-471 não se distribuem de forma homogênea, concentrando-se principalmente entre os quilômetros 524 e 533, com destaque adicional para o km 539. A análise complementar por *machine learning* indicou desempenho satisfatório do XGBoost na discriminação dos trechos de maior colisão, além de associação espacial significativa entre os valores preditos e observados. Em conjunto, os resultados reforçam que a ocorrência de CVFS resulta da interação entre a posição ao longo da rodovia e variáveis ambientais associadas a água, umidade, a vegetação e a dinâmica temporal. Assim, o estudo contribui para a identificação de segmentos prioritários da BR-471 e fornece evidências espaciais e preditivas que podem subsidiar o direcionamento de ações de monitoramento e mitigação na ESEC-Taim.

Agradecimentos

Os Autores agradecem ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental e ao curso de Ciência da Computação da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ao Grupo de Pesquisa em Modelagem Hidroambiental e Ecotecnologias da UFSM,

ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, em especial à equipe da Estação Ecológica do Taim e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), e ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa concedida à última autora, por meio do processo nº 310073/2025-1.

Referências Bibliográficas

AKIBA T et al. Optuna: A next-generation hyperparameter optimization framework. In: **Proceedings of the 25th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery & data mining**; 2019.

ANDERLE, Matteo *et al.* Habitat heterogeneity promotes bird diversity in agricultural landscapes: Insights from remote sensing data. **Basic and Applied Ecology**, v. 70, p. 38–49, ago. 2023.

BAGER, Alex; CASTRO, Érika P. Banco de dados da comunidade de mamíferos de médio e grande porte da Estação Ecológica do Taim, Rio Grande do Sul, Brasil. **Latin American Data in Science**, v. 1, 2021.

BREIMAN, Leo. Random Forests. Machine Learning, v. 45, n. 1, p. 5–32, out. 2001. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010933404324. Acesso em: 28 jan. 2026.

BOTTARO, Chiara *et al.* Ecological Insights from Above: Linking Habitat-Level NDVI Patterns with NDMI, LST and, Elevation in a Small Mediterranean City (Italy). **Land**, v. 15, n. 1, p. 57, 28 dez. 2025.

BOYLE, Sean P. *et al.* Anuran carcass persistence on roads: causes and implications for conservation. **The Journal of Wildlife Management**, v. 89, n. 4, 17 maio 2025.

BRASIL. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). **Plano de manejo da Estação Ecológica do Taim**. Brasília: ICMBIO, 2021.

COYLE, Matthew B. *et al.* Characterising the habitat of road trauma hotspots for threatened black cockatoos in metropolitan Perth, Western Australia. **Pacific Conservation Biology**, v. 32, n. 2, 9 abr. 2026.

CHEN, Tianqi; GUESTRIN, Carlos. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In: New York, NY, USA: ACM, 13 ago. 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.1145/2939672.2939785. Disponível em: https://dl.acm.org/doi/10.1145/2939672.2939785. Acesso em: 27 jan. 2026.

DAPKE, Pratibha P. *et al.* Seasonal Analysis of Vegetation, Moisture, Urbanization, and Land Surface Temperature (LST) Using NDVI, NDMI, NDWI, and NDBI Indices: A Case Study of Sillod, Maharashtra. *In*: IEEE, 7 fev. 2025.

DA SILVEIRA, Erick Eduardo et al. Anatomical study of the forelimb of capybara (Hydrochoerus hydrochaeris Linnaeus, 1766). **Zoomorphology**, v. 143, n. 2, p. 533–545, 19 ago. 2024.

ELREEDY, Dina; ATIYA, Amir F. A Comprehensive Analysis of Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE) for handling class imbalance. **Information Sciences**, v. 505, p. 32–64, dez. 2019.

EARTH RESOURCES OBSERVATION AND SCIENCE (EROS) CENTER. 2020a. Landsat 8-9 Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor Level-2, Collection 2.

EARTH RESOURCES OBSERVATION AND SCIENCE (EROS) CENTER. 2020b. Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus Level-2, Collection 2.

EARTH RESOURCES OBSERVATION AND SCIENCE (EROS) CENTER. 2020c. Landsat 4-5 Thematic Mapper Level-2, Collection 2.

GELMI-CANDUSSO, T. A. *et al.* Urban planning for wildlife connectivity: A multispecies assessment of urban sprawl and SLOSS renaturalization strategies. **Journal of Applied Ecology**, v. 62, n. 4, p. 1007–1023, 14 abr. 2025.

GUTEMA, Tariku Mekonnen *et al.* Wildlife roadkill in Southwestern Ethiopia: Hotspots, drivers, and victim species. **Heliyon**, v. 9, n. 9, p. e19783, set. 2023.

GORELICK, Noel *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18–27, dez. 2017.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBIO). Estação Ecológica do Taim.

Brasília, [s.d.]. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades de-biomas/marinho/lista-de-ucs/esec-do-taim/esec-do-taim. Acesso em: 13 jan. 2026.

JACKSON, Sean G. *et al.* Predicting Road Encounter Hotspots for Infrequently Detected Species Using Opportunistic Data: A Case Study With Blanding's Turtle (*Emydoidea blandingii*). **Ecology and Evolution**, v. 16, n. 3, 22 mar. 2026.

JANGID, Ashish Kumar *et al.* Optimal placement of wildlife crossing structures along roads in an open natural ecosystem. **Biodiversity and Conservation**, v. 35, n. 3, p. 76, 23 mar. 2026.

LUNDBERG, Scott M.; LEE, Su-In. A unified approach to interpreting model predictions. In: **CONFERENCE ON NEURAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS (NIPS)**, 31., 2017, Long Beach. Anais […]. Long Beach, 2017. Disponível em: https://arxiv.org/abs/1705.07874. Acesso em: 28 jan. 2026.

LAUBE, Patrick *et al.* Analysing and predicting wildlife–vehicle collision hotspots for the Swiss road network. **Landscape Ecology**, v. 38, n. 7, p. 1765–1783, 24 jul. 2023.

MULUALEM, Getachew et al. Examining vertebrate road mortality on highways passing through protected areas of eastern Ethiopia. **European Journal of Wildlife Research**, v. 69, n. 6, p. 117, 20 dez. 2023.

MATA, Julia C. *et al.* Capybaras (*Hydrochoerus hydrochaeris*) Generate Grazing Lawns and Maintain Plant Diversity in Neotropical Savanna. **Applied Vegetation Science**, v. 28, n. 1, 28 jan. 2025.

QUILES, Pablo; BARRIENTOS, Rafael. Interspecific interactions disrupted by roads. **Biological Reviews**, v. 99, n. 3, p. 1121–1139, jun. 2024.

RIBEIRO, Yuri Geraldo Gomes et al. Uncovering barriers and paths for ensuring road mitigation to reduce wildlife collisions: Establishing grounds for action. **Conservation Science and Practice**, 19 ago. 2025.

RAMOS, Gabriela Cortellini Ferreira; ARAÚJO, Matheus Janeck; MARINHO, Márcia. Mammals on the move: patterns, drivers, and solutions for roadkill in Southeastern Brazil. **Academia Biology**, v. 3, n. 4, 22 out. 2025.

ROMERO, Verónica L. *et al.* Trophic ecology of Cerdocyon thous and Lycalopex gymnocercus within the Iberá Ecoregion in Argentina. **THERYA**, v. 17, n. 1, p. 31–44, 15 dez. 2025.

SANA FATIMA *et al.* XGBoost and Random Forest Algorithms: An in Depth Analysis. **Pakistan Journal of Scientific Research**, v. 3, n. 1, p. 26–31, 6 jul. 2023.

SHI, Shangyu *et al.* Cumulative and time-lag effects of the main climate factors on natural vegetation across Siberia. **Ecological Indicators**, v. 133, p. 108446, dez. 2021.

SOFAER, Helen R.; HOETING, Jennifer A.; JARNEVICH, Catherine S. The area under the precision-recall curve as a performance metric for rare binary events. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 10, n. 4, p. 565–577, 14 abr. 2019.

TASSI, Rutineia et al. Wildlife Roadkill Driven by Hydrological Regime in a Subtropical Wetland. **Water**, v. 15, n. 24, p. 4307, 18 dez. 2023. ISSN 2073-4441. DOI: https://doi.org/10.3390/w15244307. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073 4441/15/24/4307. Acesso em: 14 jan. 2026.

VIVIANO, Andrea *et al.* What a camera trap survey can reveal about the behaviour of an invasive species: Insights from coypus Myocastor coypus in an urban park of central Italy. **Applied Animal Behaviour Science**, v. 284, p. 106534, mar. 2025.

WANG, Ying *et al.* The fine-scale movement pattern of Amur tiger (*Panthera tigris altaica*) responds to winter habitat permeability. **Wildlife Letters**, v. 1, n. 3, p. 119–130, 31 set. 2023.

ZHANG, Hongxue *et al.* NDVI dynamic changes and their relationship with meteorological factors and soil moisture. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 16, p. 582, 21 ago. 2018.

ZHE, Meng; ZHANG, Xueqin. Time-lag effects of NDVI responses to climate change in the Yamzhog Yumco Basin, South Tibet. **Ecological Indicators**, v. 124, p. 107431, maio 2021.

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE PONDERAÇÃO POR AVALIAÇÃO HUMANA E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ANÁLISE DE RESTRIÇÃO AMBIENTAL EM AMBIENTE SIG

Tony de Jesus Frigo, Carlos Sun, Jacqueline Zanin Lima
Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP);
e-mail: tonyjfrigo@gmail.com, carlossun815@gmail.com, jacqueline.zanin.lima@usp.br

Palavras-chave: Análise Multicritério; Planejamento Ambiental; Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Resumo

Este estudo realiza uma análise comparativa entre dois modelos de ponderação multicritério aplicados à delimitação de restrições ambientais ao uso e ocupação do solo, focando em uma gleba de alta relevância ambiental localizada na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, em São Carlos (SP). A pesquisa se fundamenta na integração de variáveis geotécnicas e legais em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), utilizando o *software* QGIS para o processamento de dados espaciais, incluindo Modelo Digital de Terreno (MDT), declividade e uso e ocupação do solo, além da delimitação de Áreas de Preservação Permanente (APP) de recursos hídricos, com o objetivo de confrontar a eficácia de um modelo baseado em avaliação técnica humana com outro proposto por algoritmos de inteligência artificial (IA) generativa. Metodologicamente, o método humano incorporou as áreas de APP como fator normativo de caráter multiplicativo, garantindo a exclusão de áreas legalmente protegidas, enquanto a abordagem de IA operou sob uma lógica de média ponderada simples entre os critérios. Os resultados evidenciaram discrepâncias expressivas na espacialização das restrições: o primeiro arranjo demonstrou maior sensibilidade ambiental, com predominância de classes de alta e muito alta restrição que englobam aproximadamente 69,2% da gleba de estudo, sendo mais condizente com as fragilidades locais. Em contrapartida, o segundo apresentou uma tendência à suavização dos resultados, com concentração em classes de restrição muito baixa e baixa, que ocupam juntas cerca de 80,7% da gleba, indicando uma subestimação de vulnerabilidades e uma menor aderência ao peso normativo das áreas de APP. Conclui-se que, embora a inteligência artificial se mostre uma ferramenta exploratória ágil para análises preliminares, a avaliação técnica humana permanece indispensável para aplicações de planejamento territorial e gestão ambiental, por assegurar a conformidade legal e a proteção efetiva das áreas ambientalmente sensíveis.

Introdução

O desenvolvimento tecnológico, científico e socioeconômico das sociedades humanas tem contribuído, ao longo da História, com o aumento da exploração predatória dos recursos naturais do planeta e a degradação do meio ambiente. Em função disso, torna-se cada vez mais urgente que o planejamento territorial conte não apenas com enfoque socioeconômico, mas, também, ambiental. No entanto, a gestão espacial sustentável e eficiente requer o cruzamento de dados geoespaciais de diferentes planos de informação em um único ambiente dinâmico, o que inclui as restrições legais da legislação vigente e os aspectos físicos e socioambientais do terreno (Paredes, 1994).

Nesse contexto, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) se destacam como plataformas que possibilitam a análise integrada de dados espaciais e georreferenciados de diferentes esferas, se consolidando como uma importante ferramenta para o planejamento ambiental (Maximiano, 1996). Assim, a tecnologia SIG tem sido usada nas últimas décadas por diferentes setores que tratam da questão ambiental no planejamento territorial, pois a avaliação integrada de um grande número de variáveis se torna possível e simplificada com o uso desses programas, permitindo a geração de informações e produtos cartográficos, e havendo também a possibilidade da inclusão de variáveis anteriormente não previstas com as suas ferramentas de análise e processamento de dados (Donha; Souza; Sugamosto, 2006).

Paralelamente à evolução das ferramentas geoespaciais, nos últimos anos o cenário científico global testemunhou a ascensão disruptiva dos algoritmos de inteligência artificial (IA), que se tornaram capazes de processar e analisar dados quantitativos e qualitativos de forma acessível ao público (Barros, 2024). Nesse cenário, os algoritmos de IA podem apresentar vários benefícios, como a automação da definição e cálculo de pesos em análises multicritério e a interpretação de grandes volumes de dados em um curto espaço de tempo, mas, como toda tecnologia emergente, ainda requerem testes a fim de validar sua aplicabilidade.

O município de São Carlos (SP) apresenta um cenário de acentuada pressão sobre o meio físico, decorrente da expansão das atividades antrópicas, com destaque para a urbanização. A sua formação está associada a um núcleo original, que se desenvolveu ao longo de rios e córregos, como o Córrego do Gregório, cuja bacia hidrográfica passou por alterações devido ao avanço da malha urbana, incluindo a canalização de cursos d'água e a construção de pavimentos impermeáveis (Herzog, 2013). Diante disso, o presente estudo busca realizar uma análise geoespacial detalhada desta bacia, utilizando o programa QGIS, um SIG com código livre, para caracterizar uma área de alta relevância ambiental na bacia sob a ótica do planejamento territorial, gerando cartas de restrição ambiental ao uso do solo como produto final. Além disso, propõe-se a comparação entre uma modelagem elaborada por avaliação humana e outra gerada por IA generativa, sendo utilizada a versão mais famosa e acessível ao público em geral, o ChatGPT, para avaliar a aplicabilidade dessa ferramenta no desenvolvimento de modelos de restrição ambiental.

Material e Métodos

Para a realização deste estudo, utilizou-se o *software* de código aberto QGIS (versão 3.34.15), adotando-se o sistema de referência de coordenadas SIRGAS 2000/UTM zona 23S para o processamento, análise e espacialização dos dados. O procedimento estruturou-se em duas etapas principais:

(i) Caracterização espacial da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório

A área de estudo compreende a parcela do município de São Carlos inserida na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório. Sua escolha ocorreu devido à forte pressão advinda do processo de urbanização intensificado nas últimas décadas. Historicamente, a bacia hidrográfica apresenta um processo contínuo de expansão urbana sobre áreas anteriormente agropecuárias, concentrado nas porções oeste e centro-sul. Análises temporais indicam que, entre 1985 e 2023, a configuração das áreas vegetadas oscilou entre períodos de fragmentação e expansão, consolidando, no cenário atual, uma maior preservação nas porções leste e sul. A base cartográfica da área de estudo (Figura 01) foi construída a partir da vetorização de curvas de nível, pontos cotados, rede de drenagem e limite da área de interesse extraídos das folhas topográficas (em escala 1:10.000) do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC-SP), além da delimitação manual da bacia hidrográfica no *software* QGIS, realizada com base na interpretação da topografia e dos divisores de águas locais.

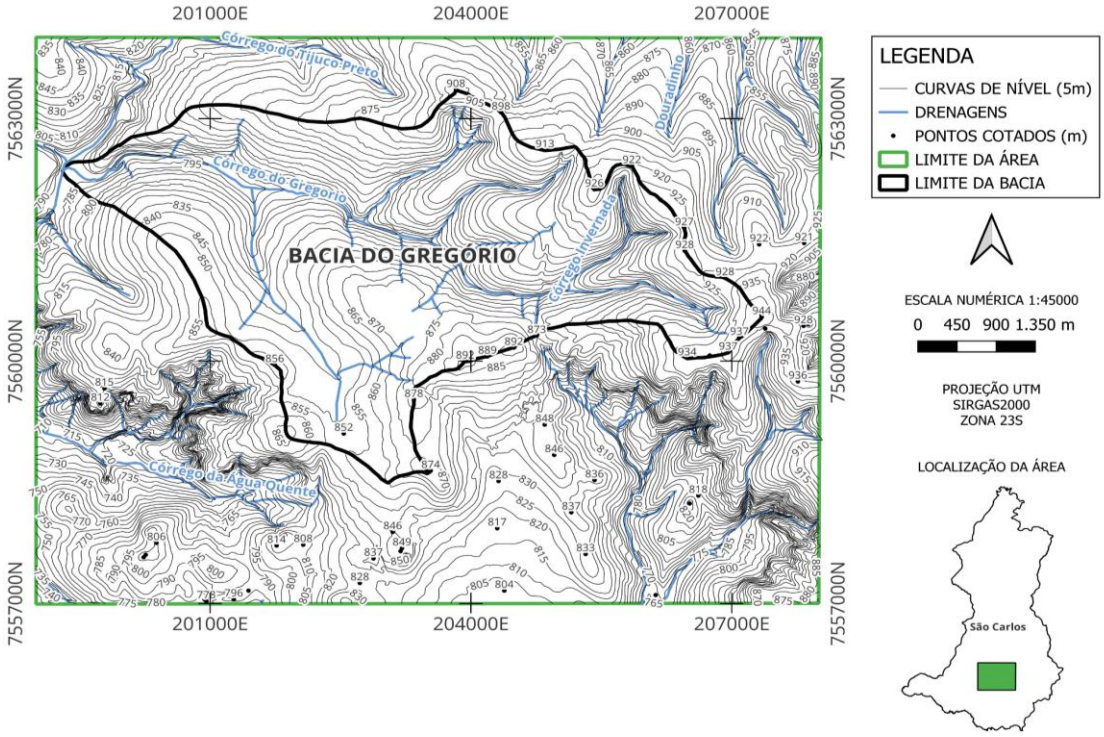


Figura 01: Base cartográfica da área da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório.

A base cartográfica constitui o *layout* fundamental do projeto, servindo de suporte para a elaboração dos mapas temáticos subsequentes. Sua importância reside na capacidade de permitir a identificação precisa da área de estudo, a delimitação da bacia hidrográfica analisada e a localização de seus principais elementos geográficos. Por meio desse produto cartográfico, é possível visualizar a trajetória completa do Córrego do Gregório, desde as nascentes de seus afluentes até sua foz no Rio Monjolinho, bem como observar os divisores topográficos que definem os limites naturais da bacia.

Em seguida, para o mapeamento da restrição ambiental foram considerados os seguintes parâmetros:

a) Declividade: para análise de declividade, gerou-se inicialmente o Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de estudo, o qual permite a visualização mais clara e contínua das variações altimétricas por meio da classificação da altitude em faixas distintas, atribuídas a diferentes tonalidades para facilitar sua interpretação visual. Ele foi gerado no ambiente do QGIS a partir do método de interpolação por Rede Triangular Irregular (TIN), utilizando como dados de entrada as curvas de nível e os pontos cotados previamente inseridos. A partir do MDT, foi produzido o mapa de declividade relativo à mesma área, com a grandeza medida em porcentagem e dividida em 5 classes.

b) Distância dos corpos d'água: esta variável tem relação direta com as Áreas de Preservação Permanente (APP) associadas aos recursos hídricos da bacia a partir dos seus componentes demarcados na base cartográfica (Figura 01). Utilizou-se a ferramenta de "*buffer*" no QGIS para estabelecer as faixas marginais de proteção: 50 metros para nascentes e para o espelho d'água, e 30 metros para os cursos d'água, conforme as exigências da Lei nº 12.651/2012 (Código Florestal) para os corpos hídricos identificados.

c) Uso e ocupação do solo: os dados foram obtidos através do complemento "MapBiomas Collection Official", disponível no QGIS, que permite a extração de arquivos raster referentes à cobertura e uso da terra com base em séries temporais padronizadas. Para este estudo foram considerados os dados de 2023.

(ii) Análise de restrição ambiental para uma gleba de interesse localizada na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório

Optou-se por analisar a porção central superior da bacia hidrográfica (Figura 02) devido ao fato de ela reunir características ambientais e espaciais relevantes, como a concentração de um grande número de nascentes, e diversos afluentes e subafluentes do curso principal, além de incluir um trecho do próprio Córrego do Gregório. Trata-se também de uma zona de transição entre o perímetro urbano e áreas de vegetação remanescente e de produção agropecuária, representando um dos possíveis vetores de expansão urbana, o que aumenta a importância da área no contexto do planejamento ambiental. Adicionalmente, a gleba abrange setores com algumas das maiores declividades da bacia, o que também contribui para sua vulnerabilidade ambiental. Desse modo, é esperado que haja grandes restrições quanto à sua ocupação, justificando sua escolha para as análises de restrição ambiental desenvolvidas neste estudo.

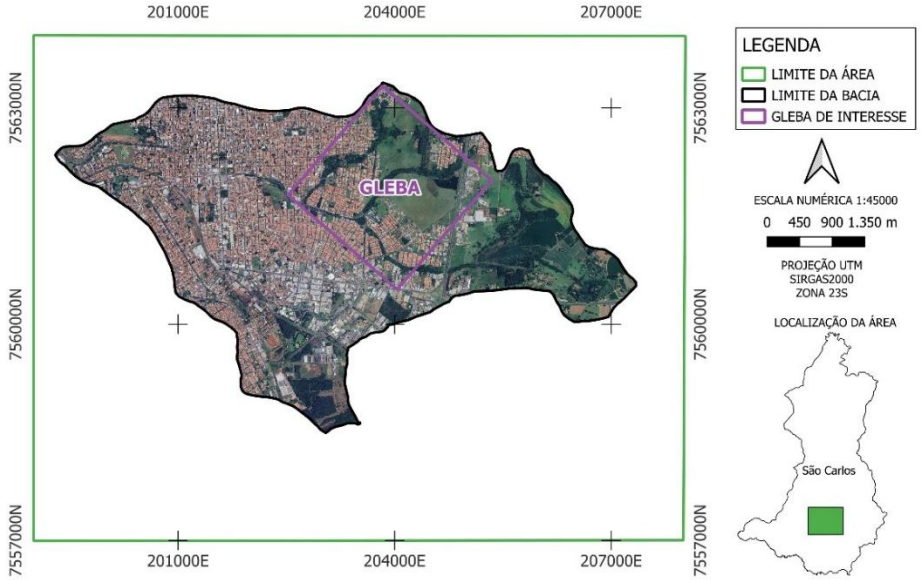


Figura 02: Mapa de localização da gleba de interesse na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório.

Para a elaboração do primeiro mapa de restrição ambiental, foi definido um sistema de ponderação para as classes dos três planos de informação considerados: declividade, presença de APP e uso e ocupação do solo, adotando-se valores de 1 a 9 para as classes de cada condicionante (Ponderação humana, Tabela 01), sendo que a pontuação é diretamente proporcional ao grau de limitação, sendo 9 atribuído à restrição "muito forte" e 1 à restrição "muito baixa".

Condicionante	Classe	Peso	
		Ponderação humana	Ponderação por IA
Declividade (%)	Muito Alta (> 30)	9	5
	Alta (12 a 30)	7	4
	Média (6 a 12)	5	3
	Baixa (3 a 6)	3	2
	Muito Baixa (0 a 3)	1	1
	Muito Alta (> 30)	9	5
APP	Sim	9	5
	Não	1	1
Uso e Ocupação	Área Vegetada	9	5
	Área Não Vegetada Natural	7	4
	Área de Produção Agropecuária	3	2
	Área Urbana	1	1

Tabela 01: Pesos atribuídos por avaliação humana e inteligência artificial para análise de restrição ambiental.

As áreas com presença de APP foram conferidas com peso máximo, em função do seu caráter legalmente protegido e de sua elevada relevância socioambiental. Em contrapartida, as áreas sem APP receberam o valor mínimo por não apresentarem, isoladamente, restrições diretas à ocupação. Para o uso e ocupação do solo, o maior peso foi atribuído às áreas vegetadas, em razão de sua importância ecológica, incluindo a conservação da biodiversidade e os diversos serviços ambientais associados. Em seguida, foram consideradas as áreas naturais não vegetadas, que, embora sem cobertura arbórea, ainda representam feições típicas com importantes funções ecossistêmicas. As áreas agropecuárias receberam um valor menor do que as áreas naturais não vegetadas por apresentarem um certo grau de alteração, enquanto as áreas urbanas foram associadas ao valor mínimo devido ao seu elevado nível de antropização. Já no caso da declividade, os pesos foram distribuídos de forma crescente e equidistante

conforme o aumento do valor de sua classe, justificada pelo aumento do risco associado à ocupação de terrenos inclinados e à possível presença de APP associadas à declividade, que não foram demarcadas diretamente neste estudo.

A determinação do Índice de Restrição Ambiental (RA) se deu pela combinação dos pesos dessas três variáveis, de modo que o peso das áreas de APP atuou como fator multiplicador sobre a média aritmética dos pesos de uso e ocupação do solo e de declividade. Essa estrutura reflete a importância legal dessa variável: por ser um critério restritivo, ela condiciona o índice final, funcionando como um filtro determinante que sobrepõe a proteção legal às demais características da área analisada.

Por sua vez, a segunda carta de restrição ambiental foi elaborada a partir de um modelo de ponderação proposto por inteligência artificial, utilizando o modelo ChatGPT (OpenAI, GPT-4o-turbo, versão de julho de 2025). Para isso, foi empregado um *prompt* (isto é, um conjunto de instruções ou comandos) solicitando a definição dos pesos dos condicionantes utilizados (declividade, presença de APP e uso e ocupação do solo), bem como a expressão matemática adotada para a sua ponderação e a justificativa técnica para a abordagem escolhida.

Como resultado, a lógica de ponderação adotada pela IA considerou o uso e ocupação do solo como o fator central na definição do grau da fragilidade ambiental de uma área, com maiores valores associados a áreas vegetadas e menores valores a áreas antropizadas. Para a declividade, os valores foram definidos progressivamente conforme o aumento da inclinação, refletindo o aumento da susceptibilidade à erosão e das limitações à ocupação. Enquanto para as APP, foi adotado o valor máximo para as áreas protegidas e o valor mínimo para as áreas não protegidas, considerando sua importância e caráter de restrição legal (Ponderação por IA, Tabela 01).

O modelo gerado por IA se baseou numa média ponderada, e as ponderações atribuídas foram de 0,4 para o fator de uso e ocupação do solo, 0,3 para declividade e 0,3 para presença de APP, com valores variando de 1 a 5 para as classes de cada condicionante.

Em ambas as cartas, o RA foi calculado através da ferramenta do QGIS “Calculadora raster”, sendo expresso na respectiva escala e classificado em cinco categorias de restrição ambiental: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta.

Resultados e Discussão

A análise do MDT revela que a bacia do Gregório possui uma variação altimétrica no intervalo de 760 a 950 metros. Nota-se que as áreas de maior altitude (910 a 950 m), concentram-se na porção leste da bacia, enquanto as de altitudes mais baixas (760 a 810 m), em sua porção oeste. Essa distribuição espacial está de acordo com o esperado, visto que as regiões de nascente se concentram no lado leste, enquanto o exutório da bacia se situa no oeste, indicando um escoamento resultante no sentido leste-oeste, condizente com o decréscimo altimétrico representado no MDT.

Em relação à declividade, nota-se a predominância de valores no intervalo de muito baixas a médias, ou seja, entre 0 e 12%, enquanto declividades altas e muito altas (ou seja, acima de 12%), encontram-se quase totalmente concentradas na porção norte da bacia e/ou nos entornos das drenagens (Figura 03). Esse perfil revela uma bacia hidrográfica com uma suscetibilidade à erosão relativamente baixa e a deslizamentos ainda menor, apresentando assim uma predominância de solos profundos a médios e de baixas velocidades de escoamento superficial. No entanto, nas margens das drenagens localizadas na porção norte da bacia, há a predominância de declividades mais altas, acima de 12% (sendo superior a 30% em alguns pontos), indicando, assim, a presença de solos rasos a muito rasos e suscetibilidade à erosão alta a muito alta, mas ainda com uma suscetibilidade a deslizamentos média a baixa.

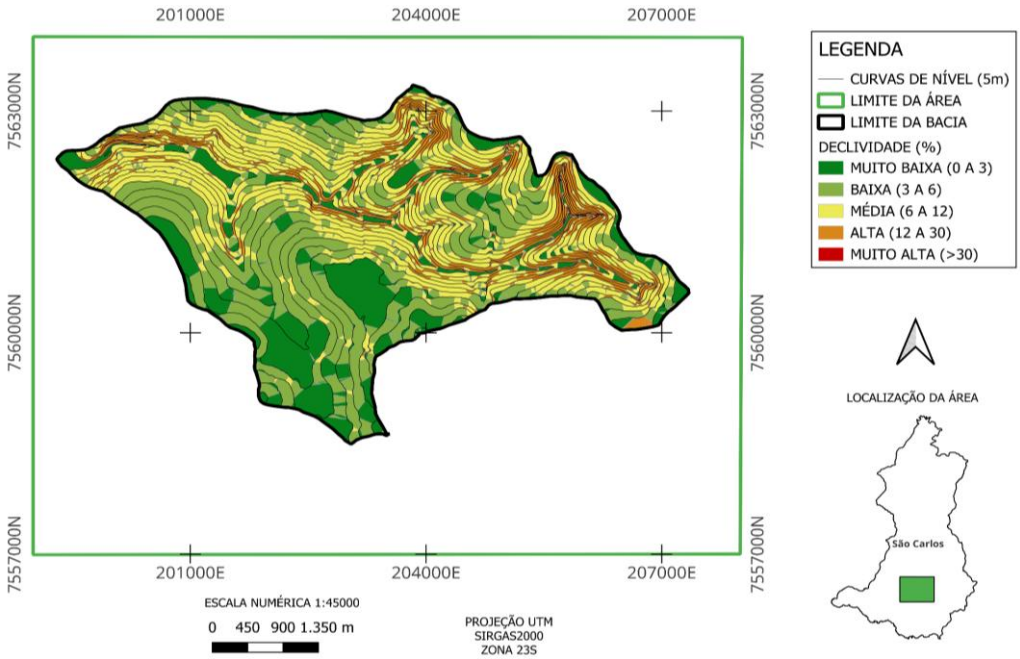


Figura 03: Mapa de declividade da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório.

Também foram calculadas, no QGIS, as áreas correspondentes às cinco classes de declividade, em valores absolutos (m²) e percentuais (%), conforme apresentado na Tabela 02. Os resultados confirmam a análise visual do mapa de declividade, evidenciando o predomínio de relevo suave, com classes de declividade muito baixa a média somando 16.479.917,0 m², o equivalente a 87,4% da área total da bacia, indicando uma paisagem majoritariamente pouco acidentada. Por outro lado, as áreas com declividade alta e muito alta apresentam distribuição mais restrita, concentrando-se principalmente em setores de maior densidade de curvas de nível, associados a encostas mais íngremes. Em especial, a classe de declividade muito alta corresponde a 58.686,2 m², apenas 0,3% da área total, configurando uma participação ínfima no contexto geral da bacia.

Declividade (%)	Área absoluta (m²)	Área relativa (%)
Muito baixa (0 a 3)	3.986.636,0	21,1
Baixa (3 a 6)	6.140.018,5	32,6
Média (6 a 12)	6.353.262,5	33,7
Alta (12 a 30)	2.315.139,2	12,3
Muito alta (> 30)	58.686,2	0,3

Tabela 02: Áreas referentes a cada faixa de declividade na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório.

Quanto aos recursos hídricos, foi identificada na bacia hidrográfica do Gregório uma rede contendo várias drenagens, 24 nascentes e um espelho d'água (Figura 04). As nascentes estão localizadas principalmente em regiões de altas elevações e declividades, como pode ser observado em comparação com o MDT e o mapa de declividade, respectivamente. Desse modo, observa-se uma densidade aproximada de 1,27 nascentes/km² na bacia do Gregório, o que é um valor considerado moderado a alto, embora dentro do esperado para uma área de Cerrado ou Mata Atlântica, como é o caso. A bacia apresenta uma densidade considerável de áreas de APP, distribuídas por toda a extensão, mas com maior concentração na porção centro-leste. Este setor abrange as maiores elevações e declividades, concentrando as nascentes, a rede de drenagem e o único espelho d'água identificado. Segundo a análise de imagens de satélite e mapas de uso e ocupação, essa região preserva remanescentes de vegetação nativa, áreas agropecuárias e formações naturais não florestais, elementos que corroboram a manutenção dos recursos hídricos locais. Em contraste, a porção oeste encontra-se densamente urbanizada desde 1985, apresentando maior descaracterização ambiental. Ao final da análise, a área total de APP na bacia foi quantificada em 1.730.013,7 m².

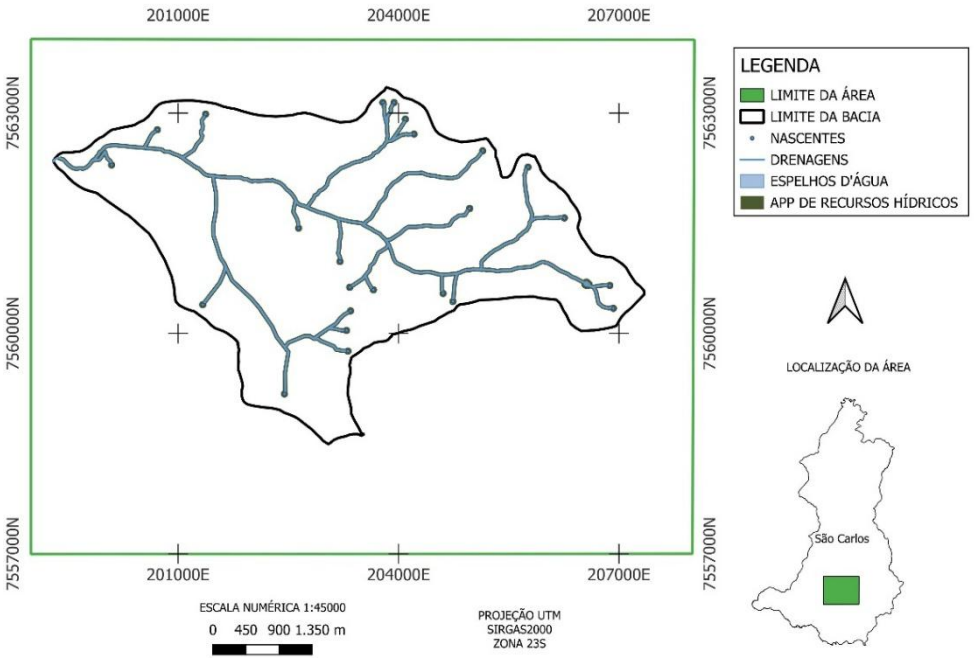


Figura 04: Mapa de APP da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório.

O uso e ocupação atual da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório é predominantemente urbano (Figura 05), com a presença expressiva de áreas residenciais e comerciais bem consolidadas, sobretudo em sua porção oeste, próximo ao exutório. As áreas rurais, com produção agropecuária, embora em menor proporção, ainda se apresentam de forma significativa, e concentram-se principalmente na região leste da bacia, justamente nas faixas de maior altitude identificadas no MDT. Além disso, a interpretação de imagens de satélite revela que a cobertura vegetal ciliar não é contínua, indicando supressão de APP nas zonas de maior pressão antrópica. Tal cenário compromete a integridade ecológica do Córrego do Gregório e o configura como um potencial vetor de poluição difusa para o Rio Monjolinho, corpo receptor final de suas águas. A ausência dessa barreira vegetal também acelera o escoamento superficial e o transporte de sedimentos, agravando os riscos de inundação no setor urbano. Consequentemente, essa degradação reduz a resiliência da bacia hidrográfica frente a eventos hidrológicos extremos.

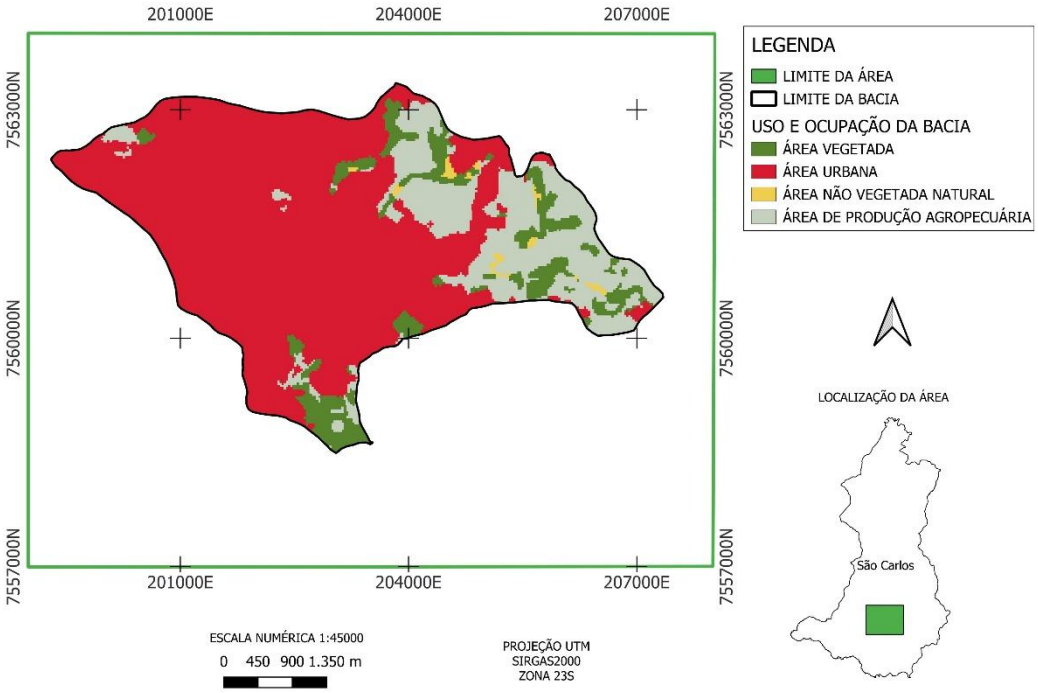


Figura 05: Mapa de uso e ocupação da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório.

A partir da caracterização da bacia hidrográfica de estudo e da aplicação das metodologias de ponderação desenvolvidas, foi delimitada uma gleba de interesse com área aproximada de 4 km² (Figura 02), a partir da qual foram geradas as duas cartas de restrição ambiental, cada uma utilizando o seu conjunto distinto de pesos para os três planos de informação analisados: declividade, presença ou ausência de APP e uso e ocupação do solo (Tabela 01).

O mapa de restrição ambiental gerado por avaliação humana (Figura 06) obteve valores de RA entre 1 e 81, que foram reclassificados conforme as categorias já citadas. Observa-se na carta que as áreas de restrição ambiental rotuladas como alta e muito alta representam a maior parcela da gleba, sendo correspondentes principalmente às áreas de APP, de vegetação nativa e/ou localizadas em encostas íngremes. Assim, áreas de restrição ambiental média, baixa e muito baixa representam uma parcela minoritária da gleba, correspondendo a áreas menos íngremes, sem vegetação nativa e/ou APP. Esse padrão espacial está de acordo com as características observadas na área, que apresenta uma alta densidade de nascentes e cursos d'água, valores de declividade predominantemente médios a altos e o uso e ocupação do solo marcado por áreas vegetadas ou de produção agropecuária, justificando a elevada restrição ambiental associada.

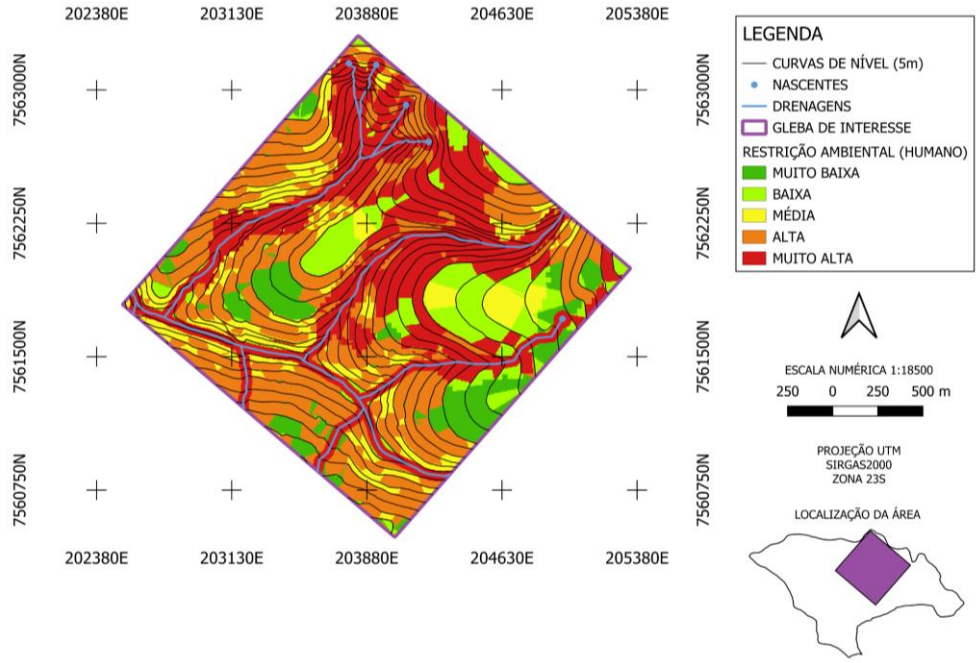


Figura 06: Carta de restrição ambiental gerada por avaliação humana para a gleba de interesse.

Já a carta de restrição ambiental obtida a partir do modelo de ponderação desenvolvido por IA (Figura 07) obteve valores de RA entre 1 e 5, que foram reclassificados para as mesmas categorias da primeira carta, visando permitir a comparação entre ambos. Visivelmente, nota-se que esta carta é significativamente mais permissiva do que a anterior, com áreas de restrição ambiental baixa e muito baixa compondo a maior parcela da gleba. Observa-se, também, que as APP não representam necessariamente o nível mais alto de restrição à ocupação humana, diferentemente do outro modelo, o que é decorrente da redução drástica da importância dessa variável nesta ponderação, que trata esse condicionante apenas como um aspecto adicional na média ponderada, reduzindo a sua influência relativa ao final. Assim, as áreas de maior restrição ambiental estão limitadas a locais que combinam simultaneamente a presença de áreas de APP, vegetação nativa e altas declividades, ou seja, somente quando os três condicionantes manifestam simultaneamente suas classes mais restritivas. Nos demais casos, predominam valores de restrição baixa a muito baixa, indicando uma tendência geral de suavização dos níveis de restrição ao longo de toda a gleba. Esse padrão reflete a natureza compensatória do modelo de ponderação simples, no qual fatores menos restritivos reduzem significativamente o índice final, mesmo quando são considerados aspectos ambientalmente mais sensíveis na ponderação.

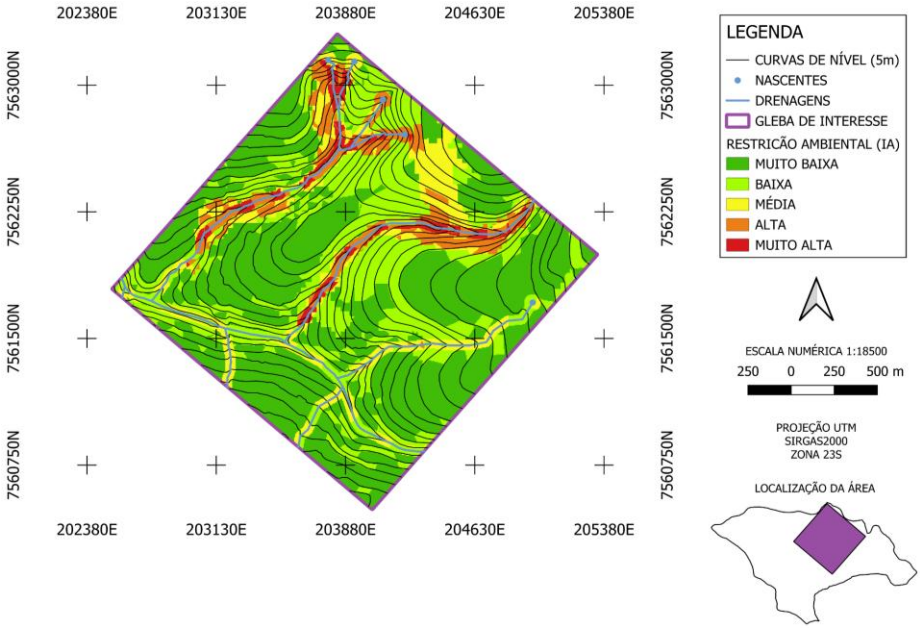


Figura 07: Carta de restrição ambiental gerada por inteligência artificial para a gleba de interesse.

Além da geração das cartas de restrição ambiental, também foram calculadas, ainda através do QGIS, as áreas absolutas e relativas para cada classe de restrição em ambas as cartas, associadas, respectivamente, aos pesos gerados por avaliação humana e inteligência artificial (Tabela 03).

Restrição Ambiental	Ponderação humana		Ponderação por IA	
	Área absoluta (m²)	Área relativa (%)	Área absoluta (m²)	Área relativa (%)
Muito baixa	346.451,8	8,7	2.057.735,9	51,5
Baixa	402.452,0	10,1	1.165.784,2	29,2
Média	475.948,5	12,0	384.973,4	9,6
Alta	1.357.316,4	34,2	279.676,6	7,0
Muito alta	1.392.123,8	35,0	103.848,3	2,6

Tabela 03: Áreas referentes a cada faixa de restrição ambiental na gleba de interesse.

A tendência menos restritiva da carta gerada pelo modelo baseado em IA se evidencia na distribuição espacial das classes de restrição, bem como nos valores de área associados a cada categoria, de modo que as classes de restrição muito baixa e baixa ocupam cerca de 80,7% da área da gleba, enquanto as de restrição alta e muito alta apresentam uma distribuição reduzida e pontual. Em contrapartida, no modelo baseado em avaliação humana as áreas de alta ou muito alta restrição englobam aproximadamente 69,2% da gleba, evidenciando a sua maior sensibilidade ambiental, o que contrasta com o segundo cenário. Essa discrepância indica que o modelo automatizado tende a subestimar a restrição ambiental em áreas sensíveis, especialmente devido ao tratamento das áreas de APP como variáveis compensáveis ao utilizar uma metodologia de ponderação mais simples, podendo resultar em classificações inconsistentes sob a ótica do planejamento territorial ambiental.

Considerações Finais

A comparação entre os modelos de restrição ambiental evidenciou diferenças significativas decorrentes tanto da estrutura das equações adotadas quanto dos pesos e valores atribuídos aos condicionantes e suas categorias. O modelo baseado

em avaliação humana incorporou a presença ou ausência de APP como um fator normativo que atuava de forma multiplicativa sobre os demais critérios, resultando em uma maior sensibilidade à presença dessas áreas, o que reflete de modo mais consistente a legislação ambiental. Em contraste, o modelo baseado em inteligência artificial adotou a estrutura de média ponderada simples, sem distinção entre os condicionantes. Desse modo, a presença de APP poderia ser compensada pela presença de classes menos restritivas dos demais critérios, reduzindo consideravelmente sua influência na composição do índice final. Consequentemente, este modelo apresentou uma tendência à subestimação da restrição ambiental de forma global, em especial sobre às áreas legalmente protegidas, classificando certas zonas marginais como de baixa ou média restrição enquanto se tratam de áreas altamente restritas dos pontos de vista ambiental e legislativo.

Outra diferença notável entre os modelos é a resolução dos resultados, produto das diferentes escalas de ponderação adotadas. Enquanto o sistema fundamentado em avaliação humana utilizou uma maior amplitude de valores, permitindo a discriminação visivelmente mais detalhada entre as classes de restrição ambiental presentes, aquele proposto por IA apresentou uma grande suavização dos resultados, em parte também decorrente da menor amplitude de valores adotados, que causa a redução do contraste entre áreas mais e menos restritivas.

Os resultados indicam que o modelo baseado na avaliação humana apresenta maior aderência ao planejamento territorial, por integrar de forma mais discriminante as nuances legais e ambientais locais. Embora o modelo de IA tenha demonstrado uma lógica espacial coerente e zonas de convergência com o olhar especialista, sua tendência a uma restrição mais generalista sugere a necessidade de refinamento metodológico. Assim, a IA posiciona-se como uma ferramenta de suporte ágil, mas que ainda demanda a supervisão técnica para a tomada de decisão final. No entanto, vale ressaltar que foi utilizado um exemplar de IA relativamente simples e generalista, tratando-se de uma versão gratuita disponibilizada pela empresa americana OpenAI, e que opções mais recentes, robustas e especializadas (possivelmente até criadas pelo próprio analista) podem gerar modelos de ponderação de restrição ambiental mais consistentes e próximos dos resultados obtidos quando elaborados por profissionais especializados na área, sendo necessários mais estudos para explorar esse potencial de automatização.

Conclui-se que, ao menos considerando modelos mais simples de inteligência artificial generativa, como o adotado neste estudo, a definição de critérios e interpretação dos resultados no que tange o mapeamento da restrição ambiental ao uso do território permanecem dependentes de conhecimento teórico e competência técnica de profissionais especializados. Essa supervisão técnica é indispensável para garantir a coerência ambiental e a conformidade legal no planejamento territorial. Portanto, o uso de ferramentas de IA na automação de análises multicritério deve ser acompanhado de rigorosa validação, servindo como suporte e não como substituto ao processo decisório qualificado.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (n° processo: 2025/19650-2) e à Universidade de São Paulo (Programa Unificado de Bolsas de Estudo para Apoio à Formação de Estudantes de Graduação, PUB-USP, Edital 2025-2026) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

BARROS, A. Desvendando narrativas e representações: a IA aplicada à análise de dados qualitativos. *Educare et Sabere - Revista de Educação e Ensino*, v. 2, n. 2, p. 72-104, 2024. DOI: 10.5281/zenodo.10802737.

BRASIL. Lei 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. Acesso em: 11 abr. 2026.

DONHA, A. G.; SOUZA, L. C. de P.; SUGAMOSTO, M. L. Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, n. 1, p. 175-181, 2006. DOI: 10.1590/S1415-43662006000100026.

FRANCISCO, C. N.; CARVALHO, C. N. *Mapa de restrições legais ao uso e ocupação do solo*: um instrumento para a gestão ambiental. In: CONGRESSO ACADÊMICO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 2., 2006, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: UFF, 2006.

HERZOG, C. P. *Cidades para Todos*: (re)aprendendo a conviver com a natureza. 1. ed. Rio de Janeiro: Mauad X: Inverde, 2013. DOI: 10.11606/issn.2179-2275.v0i6p266-266.

MAXIMIANO, G. A. *Bacia do rio pato branco*: ensaio cartográfico para análise da fragilidade do meio físico com uso de geoprocessamento. 1996. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1996.

PAREDES, E. A. *Sistema de informação geográfica*: geoprocessamento, princípios e aplicações. São Paulo: Érica, 1994.

VICENTE, A. P. Z. *Subsídios ao planejamento da infraestrutura verde na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório (São Carlos-SP)*. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, 2023.

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MODELAGEM BASEADA EM DADOS EM SISTEMAS AMBIENTAIS: POTENCIAL, DESAFIOS E APLICAÇÕES PREDITIVAS

1 Clainer Bravin Donadel, 2 Danieli Soares de Oliveira
1 Instituto Federal do Espírito Santo – campus Vitória, e-mail: cdonadel@ifes.edu.br
2 Instituto Federal do Espírito Santo – campus Cariacica, e-mail: danieli@ifes.edu.br

Palavras-chave: Inteligência artificial; Sistemas ambientais; Modelagem baseada em dados.

Resumo

A crescente complexidade dos sistemas ambientais, associada à elevada variabilidade temporal e à interação entre processos físicos, químicos e biológicos, tem imposto desafios significativos à modelagem e à gestão desses sistemas. Nesse contexto, a crescente disponibilidade de dados ambientais tem impulsionado o uso de técnicas de inteligência artificial como ferramentas capazes de explorar relações não lineares e identificar padrões complexos. Este trabalho discute o potencial e os desafios associados à aplicação da inteligência artificial na modelagem de sistemas ambientais, com ênfase em abordagens orientadas a dados. Como forma de ilustrar essa aplicação, apresenta-se um estudo de caso voltado à predição de um parâmetro de qualidade da água em um reservatório de abastecimento, utilizando variáveis ambientais e temporais como dados de entrada. Os resultados obtidos evidenciam a capacidade das técnicas de inteligência artificial em representar a dinâmica do sistema e fornecer previsões úteis para suporte à tomada de decisão. Adicionalmente, são discutidos aspectos relacionados à qualidade dos dados, à seleção de variáveis e à generalização dos modelos, destacando limitações e oportunidades associadas ao uso dessas técnicas em aplicações ambientais. Os resultados reforçam o papel da inteligência artificial como uma ferramenta promissora para a modelagem e a gestão de sistemas ambientais.

Introdução

A modelagem de sistemas ambientais constitui um dos principais desafios da engenharia ambiental contemporânea, em razão da complexidade inerente aos processos naturais e da forte interação entre variáveis físicas, químicas e biológicas. A variabilidade temporal e espacial desses sistemas dificulta a utilização de abordagens tradicionais baseadas em modelos determinísticos simplificados, especialmente quando se busca representar dinâmicas não lineares e fenômenos de difícil caracterização (Wang, 2021).

Paralelamente, o avanço das tecnologias de monitoramento e a digitalização de processos têm ampliado significativamente a disponibilidade de dados ambientais. Esses dados podem ser provenientes de diferentes fontes, incluindo sensores em campo, estações de monitoramento, sistemas operacionais e bases históricas, dentre outras opções. Esse cenário tem favorecido o desenvolvimento de abordagens baseadas em dados, nas quais a modelagem passa a depender menos de hipóteses físicas explícitas e mais da capacidade de extrair padrões e relações a partir dos dados disponíveis (Koldasbayeva *et al*., 2024).

Nesse contexto, a inteligência artificial tem emergido como uma ferramenta promissora para a modelagem de sistemas ambientais. Técnicas baseadas em aprendizado de máquina têm sido amplamente utilizadas para problemas de previsão, classificação e otimização, permitindo capturar relações complexas entre variáveis sem a necessidade de simplificações excessivas. Essas abordagens têm sido aplicadas em diferentes áreas da engenharia ambiental, como qualidade da água, modelagem hidrológica, previsão de eventos extremos e suporte à operação de sistemas de tratamento (Ye *et al*., 2020; Alotaibi; Nassif, 2024; Olawade *et al*., 2024; Wani *et al*., 2024).

Apesar do potencial dessas técnicas, sua aplicação em sistemas ambientais ainda apresenta desafios relevantes, tais como a dependência da qualidade e da consistência dos dados, a seleção adequada de variáveis de entrada e a capacidade de generalização dos modelos para diferentes condições. Além disso, a interpretação dos modelos e a confiabilidade das previsões em cenários operacionais continuam sendo aspectos críticos a serem considerados (Elsawah *et al*., 2020).

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo discutir a aplicação da inteligência artificial na modelagem de sistemas ambientais, destacando seu potencial e suas limitações a partir de uma abordagem orientada a dados. Como forma de ilustrar essa aplicação, é apresentado um estudo de caso envolvendo a predição de turbidez em um reservatório de abastecimento. Nesse contexto específico, utiliza-se redes neurais artificiais para demonstrar como a integração de variáveis ambientais e informações temporais pode contribuir para a construção de modelos preditivos. A partir desse exemplo, busca-se evidenciar o papel das abordagens baseadas em dados como ferramentas de suporte à tomada de decisão em engenharia ambiental.

Metodologia

A metodologia foi estruturada para ilustrar a aplicação de inteligência artificial na modelagem de sistemas ambientais por meio de um estudo de caso voltado à previsão da turbidez em um reservatório de abastecimento. Para isso, utilizou-se uma rede neural artificial do tipo *feedforward*, aplicada a dados ambientais e de qualidade da água previamente disponibilizados em base aberta.

Os dados utilizados foram obtidos a partir do trabalho de Baulch et al. (2025), publicado na revista Data in Brief, intitulado “Dataset of high-frequency water quality and meteorological variables in Buffalo Pound Lake, Saskatchewan, Canada, 2014–2021”. A base reúne dados de monitoramento ambiental em um reservatório utilizado para abastecimento público,

incluindo variáveis físico-químicas da água e variáveis meteorológicas, como turbidez, pH, oxigênio dissolvido, condutividade específica, clorofila, ficocianina, temperatura da água, temperatura do ar, precipitação e radiação solar.

Para este estudo, os dados foram organizados em uma única base cronológica, a partir da consolidação dos arquivos anuais disponíveis. Em seguida, foram selecionadas as variáveis de interesse para a modelagem, removendo-se registros com dados ausentes ou inconsistentes. Esse procedimento teve como objetivo garantir a integridade das amostras utilizadas no treinamento da rede neural.

A variável de saída adotada foi a turbidez superficial, expressa em NTU. O modelo foi desenvolvido para prever a turbidez uma hora à frente, ou seja, estimar o valor da variável em um instante futuro a partir das condições observadas no instante atual. Considerando um intervalo médio de amostragem de aproximadamente 10 minutos, o horizonte de previsão correspondeu a seis passos temporais.

As variáveis de entrada foram organizadas em quatro grupos principais. O primeiro grupo correspondeu às variáveis instantâneas medidas no tempo t, incluindo parâmetros de qualidade da água e condições meteorológicas. O segundo grupo foi composto por médias móveis de uma hora, calculadas a partir das mesmas variáveis, com o objetivo de representar a condição recente do sistema. O terceiro grupo incluiu médias móveis de seis horas, permitindo incorporar efeitos de evolução mais lenta e tendências acumuladas. Por fim, o quarto grupo foi formado por variáveis temporais cíclicas, representadas pela hora do dia e pelo dia do ano, transformadas em componentes seno e cosseno, de modo a capturar padrões periódicos.

Além da seleção de variáveis, foi realizada uma verificação da consistência temporal das amostras. Registros cuja janela de dados apresentava lacunas incompatíveis com o horizonte de previsão foram removidos, garantindo que cada entrada estivesse associada a uma saída futura aproximadamente uma hora à frente. Foi adotada uma tolerância de cinco minutos em relação ao horizonte temporal esperado.

A divisão dos dados foi realizada de forma cronológica, sendo utilizados 70% dos dados para treinamento, 15% para validação e 15% para teste. Essa abordagem permite avaliar o desempenho do modelo em condições mais próximas de aplicações reais, nas quais a previsão é realizada a partir de dados passados.

A rede neural utilizada foi uma rede feedforward multicamadas, composta por duas camadas ocultas com 12 e 6 neurônios, respectivamente. O treinamento foi realizado por meio do algoritmo scaled conjugate gradient, com aplicação de regularização para reduzir o risco de sobreajuste. A camada de saída foi composta por um único neurônio, responsável pela estimativa da turbidez futura.

As funções de ativação adotadas na rede neural foram do tipo ReLU (Rectified Linear Unit) nas camadas ocultas e função linear na camada de saída. A função ReLU foi escolhida por sua capacidade de introduzir não linearidade no modelo de forma computacionalmente eficiente, além de contribuir para a estabilidade do treinamento e mitigação do problema de gradientes muito pequenos. Já a função de ativação linear na camada de saída foi adotada por se tratar de um problema de regressão, permitindo que o modelo produza valores contínuos compatíveis com a variável de interesse, neste caso, a turbidez.

O desempenho do modelo foi avaliado por meio das métricas RMSE (Root Mean Squared Error), MAE (Mean Absolute Error) e R^2 (Coeficiente de Determinação). A estrutura geral do modelo proposto, incluindo as camadas da rede neural e a organização das variáveis de entrada e saída, é apresentada na Figura 16.

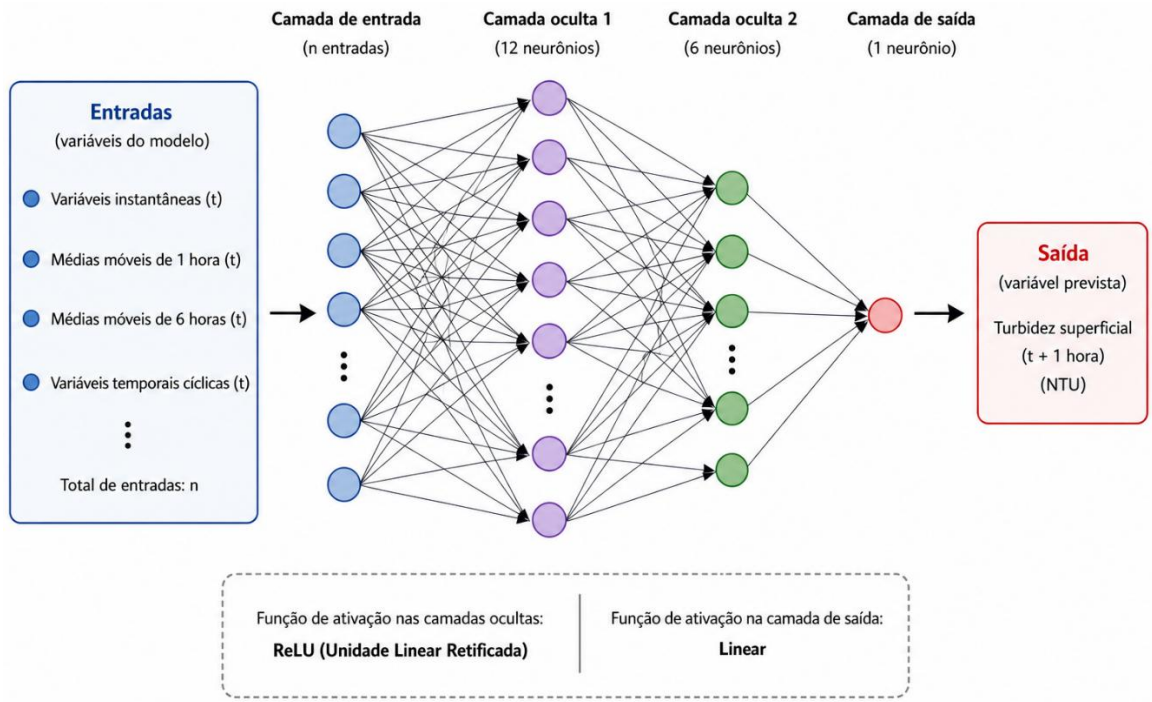


Figura 16: Estrutura da rede neural utilizada na modelagem preditiva da turbidez com horizonte de 1 hora.

Resultados e Discussão

O desempenho da rede neural artificial foi inicialmente avaliado a partir do processo de treinamento, com base na evolução do erro quadrático médio (MSE) ao longo das épocas. A Figura 17 apresenta o comportamento das curvas de erro para os conjuntos de treinamento, validação e teste.

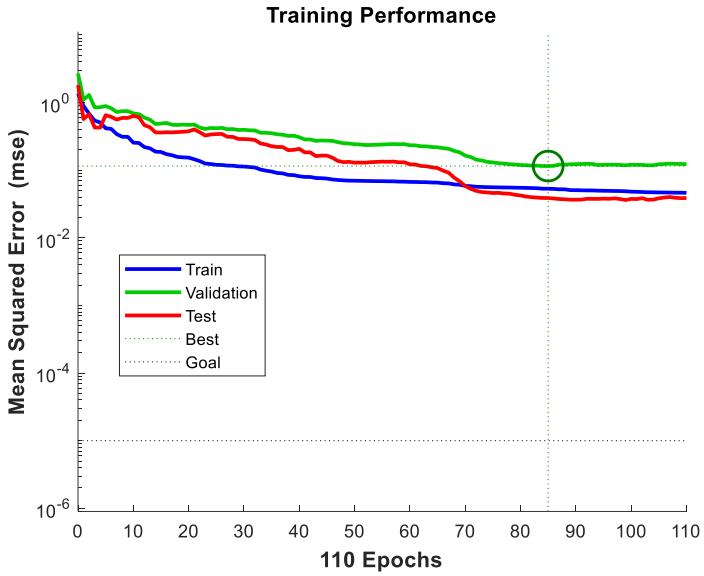


Figura 17: Evolução do erro quadrático médio (MSE) durante o treinamento da rede neural para os conjuntos de treinamento, validação e teste.

Observa-se que o modelo apresentou convergência estável, com redução consistente do erro ao longo das iterações. O treinamento foi interrompido após aproximadamente 110 épocas, em função do critério de validação (*early stopping*), indicando que o modelo atingiu um ponto adequado de generalização sem evidências de sobreajuste. As curvas de treinamento, validação e teste apresentaram comportamento semelhante, o que sugere boa capacidade de generalização da rede neural para dados não utilizados no ajuste dos parâmetros. A qualidade do ajuste do modelo também pode ser analisada a partir da relação entre valores observados e previstos, apresentada na Figura 18.

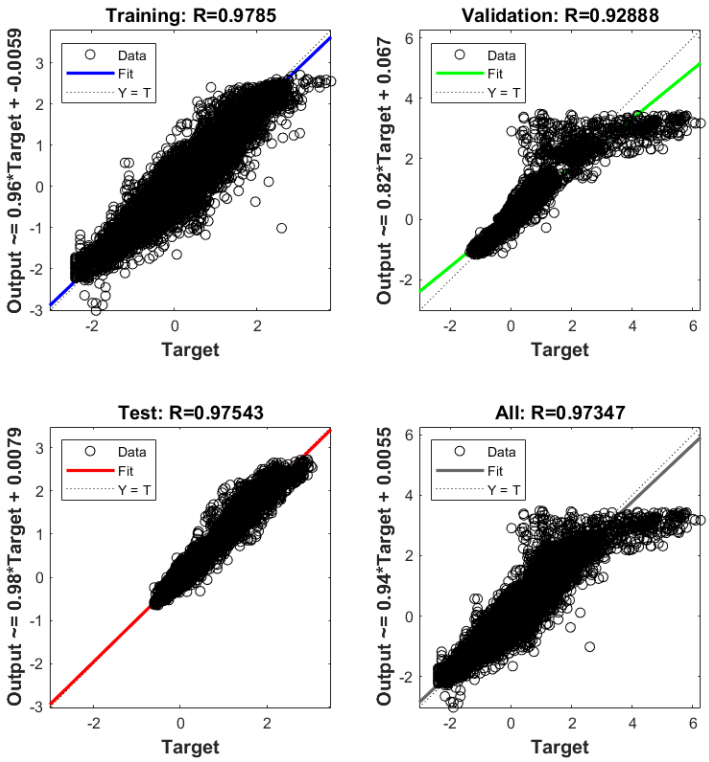


Figura 18: Relação entre valores observados e previstos de turbidez para os conjuntos de treinamento, validação e teste, incluindo coeficientes de correlação (R) e linhas de ajuste linear.

Os resultados indicam elevados coeficientes de correlação linear entre os valores previstos e observados, com $R = 0{,}9785$ ($R^2 = 0{,}9575$) para o conjunto de treinamento, $R = 0{,}9289$ ($R^2 = 0{,}8628$) para validação e $R = 0{,}9754$ ($R^2 = 0{,}9514$) para teste, resultando em um valor global de $R = 0{,}9735$ ($R^2 = 0{,}9477$). Esses valores evidenciam forte aderência entre as saídas do modelo e os dados reais, indicando que a rede neural foi capaz de capturar de forma consistente a relação entre as variáveis de entrada e a turbidez futura. Observa-se ainda que a inclinação das retas de ajuste se aproxima da unidade, indicando boa calibração do modelo, embora pequenas dispersões sejam observadas, especialmente no conjunto de validação, possivelmente associadas a maior variabilidade dos dados nesse subconjunto. A Figura 19 apresenta a comparação entre os valores observados de turbidez e as previsões realizadas pela rede neural artificial para o horizonte de previsão de uma hora.

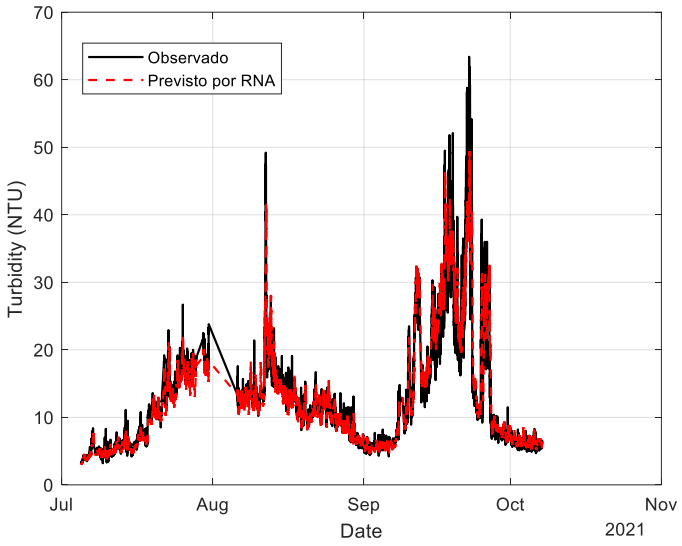


Figura 19: Comparação entre valores observados de turbidez e previsões obtidas pela rede neural artificial para horizonte de previsão de 1 hora.

Verifica-se que a rede neural foi capaz de reproduzir adequadamente a dinâmica temporal da turbidez, acompanhando tanto as variações de baixa amplitude quanto eventos de maior intensidade. Apesar disso, observa-se que em eventos de pico mais acentuados a rede apresenta maior dificuldade em capturar a magnitude exata da turbidez, o que é esperado em função da natureza altamente não linear e, por vezes, abrupta desses eventos. Ainda assim, o modelo mantém tendência coerente com o comportamento observado, o que reforça sua aplicabilidade para fins de previsão operacional. A distribuição dos erros de previsão é apresentada na Figura 20.

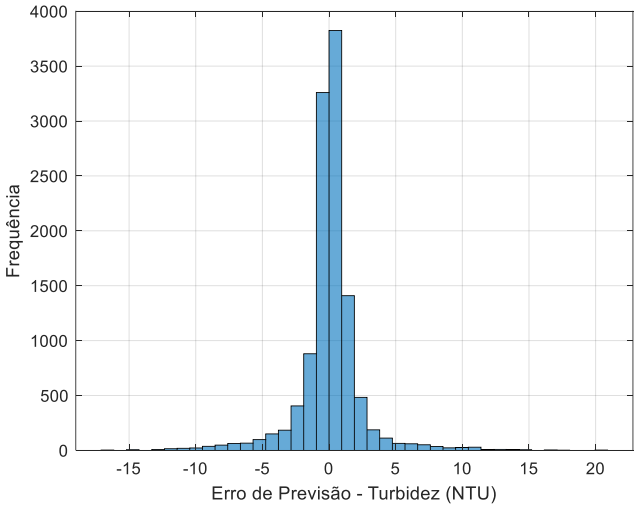


Figura 20: Distribuição dos erros de previsão da rede neural artificial para o horizonte de 1 hora, evidenciando concentração em torno de zero e ocorrência de eventos extremos.

Observa-se que os erros estão concentrados em torno de zero, com distribuição aproximadamente simétrica, indicando ausência de viés significativo nas previsões. A maior frequência de erros próximos de zero evidencia que o modelo apresenta boa acurácia para a maior parte das amostras. A presença de caudas mais alongadas na distribuição está associada a eventos extremos de turbidez, nos quais a variabilidade do sistema é mais elevada e, consequentemente, mais difícil de ser capturada pelo modelo.

De forma geral, os resultados obtidos indicam que a abordagem baseada em inteligência artificial, orientada por dados, é capaz de representar adequadamente a dinâmica da turbidez em sistemas ambientais complexos, apresentando desempenho consistente tanto em termos de erro quanto na correlação entre valores observados e previstos.

Entretanto, é importante destacar que o desempenho do modelo está diretamente relacionado à qualidade dos dados utilizados. Durante a etapa de pré-processamento, foi necessária a remoção de registros com valores ausentes, inconsistências e lacunas temporais, bem como a aplicação de transformações e normalizações. Esses procedimentos foram fundamentais para garantir a coerência das amostras e a estabilidade do treinamento da rede neural.

A presença de ruídos, falhas de sensores e descontinuidades na série temporal pode comprometer significativamente o desempenho de modelos baseados em dados, especialmente em técnicas de inteligência artificial, que são altamente sensíveis à qualidade das informações de entrada. Nesse contexto, a etapa de tratamento dos dados se mostra tão importante quanto a escolha do modelo em si, sendo determinante para a obtenção de resultados confiáveis.

Além disso, a necessidade de seleção adequada das variáveis de entrada evidencia a importância do conhecimento do sistema físico em conjunto com as técnicas de modelagem. A inclusão de variáveis representativas de diferentes processos ambientais contribuiu para melhorar a capacidade preditiva do modelo, permitindo capturar relações que não seriam facilmente identificadas por abordagens tradicionais.

Por fim, os resultados obtidos reforçam o potencial das técnicas de inteligência artificial como ferramentas de suporte à modelagem de sistemas ambientais, ao mesmo tempo em que evidenciam a importância de práticas rigorosas de tratamento e validação dos dados. A integração entre qualidade dos dados, seleção de variáveis e escolha do modelo constitui um fator determinante para o sucesso de aplicações desse tipo em engenharia ambiental.

Conclusões

Os resultados obtidos demonstraram que a aplicação de técnicas de inteligência artificial constitui uma abordagem eficaz para a modelagem de sistemas ambientais, sendo capaz de capturar relações complexas entre variáveis e reproduzir adequadamente a dinâmica da turbidez em um reservatório de abastecimento. A rede neural artificial empregada apresentou elevado desempenho preditivo, evidenciado por altos coeficientes de correlação e coeficientes de determinação próximos de 1, além de boa aderência entre valores observados e estimados.

Adicionalmente, os resultados evidenciam que o desempenho de modelos de inteligência artificial orientados por dados depende fortemente da qualidade dos dados utilizados. Etapas de pré-processamento, como tratamento de valores ausentes, remoção de inconsistências e verificação da coerência temporal, mostraram-se fundamentais para garantir a estabilidade do treinamento e a confiabilidade das previsões. Nesse sentido, destaca-se que a qualidade e representatividade das variáveis de entrada são tão determinantes quanto a escolha do modelo em si.

Por fim, conclui-se que a utilização de inteligência artificial na engenharia ambiental apresenta elevado potencial como ferramenta de suporte à modelagem e à tomada de decisão, especialmente em cenários caracterizados por elevada complexidade e disponibilidade de dados. A abordagem apresentada, embora ilustrada por meio de um estudo de caso específico, pode ser estendida a outros sistemas ambientais, reforçando a relevância de métodos orientados a dados no contexto da engenharia ambiental contemporânea.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), ao Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e institucional ao desenvolvimento da pesquisa.

Referências Bibliográficas

ALOTAIBI, E.; NASSIF, N. Artificial intelligence in environmental monitoring: in-depth analysis. **Discover Artificial Intelligence**, v. 4, p. 84, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s44163-024-00198-1.

BAULCH, Helen M.; FILAZZOLA, Alessandro; VARGAS, Rodrigo; LAROQUE, Christopher P.; VANDERKOOY, Steven J.; MCKENZIE, Erica R.; POMEROY, John W.; YATES, Adam G.; BOYER, Gregory L.; WATSON, Sarah B. Dataset of high-frequency water quality and meteorological variables in Buffalo Pound Lake, Saskatchewan, Canada, 2014–2021. **Data in Brief**, v. 55, p. 110589, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.110589.

ELSAWAH, S.; FILATOVA, T.; JAKEMAN, A. J.; KETTNER, A. J.; ZELLNER, M. L.; ATHANASIADIS, I. N.; HAMILTON, S. H.; AXTELL, R. L.; BROWN, D. G.; GILLIGAN, J. M.; JANSSEN, M. A.; ROBINSON, D. T.; ROZENBERG, J.; ULLAH, I. I. T.; LADE, S. J. Eight grand challenges in socio-environmental systems modeling. **Socio-Environmental Systems Modelling**, v. 2, 16226, 2020. DOI: https://doi.org/10.18174/sesmo.2020a16226.

KOLDASBAYEVA, Diana; TREGUBOVA, Polina; GASANOV, Mikhail; ZAYTSEV, Alexey; PETROVSKAIA, Anna; BURNAEV, Evgeny. Challenges in data-driven geospatial modeling for environmental research and practice. **Nature Communications**, v. 15, p. 10700, 2024. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-024-55240-8.

OLAWADE, D. B.; WADA, O. Z.; IGE, A. O.; EGBEWOLE, B. I.; OLOJO, A.; OLADAPO, B. I. Artificial intelligence in environmental monitoring: advancements, challenges, and future directions. **Hygiene and Environmental Health Advances**, v. 12, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heha.2024.100114.

WANG, Can. Grand challenges in environmental systems engineering. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, 2021. DOI: https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.809627.

WANI, A. K.; RAHAYU, F.; BEN AMOR, I. et al. Environmental resilience through artificial intelligence: innovations in monitoring and management. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, p. 18379–18395, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-024-32404-z.

YE, Zhiping; YANG, Jiaqian; ZHONG, Na; TU, Xin; JIA, Jining; WANG, Jiade. Tackling environmental challenges in pollution controls using artificial intelligence: a review. **Science of the Total Environment**, v. 699, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134279.

PREVISÃO DE NÍVEL DE RIO EM CURTO PRAZO COM APRENDIZADO DE MÁQUINA A PARTIR DE DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS

1 Felipe Brum Rossato, 2 Raimundo Celeste Ghizoni Teive, 3 Lucas Carneiro Baptista, 4 Jhonatan Acácio Silva
1 Univali, e-mail: felipe.rossato@univali.br; 2 Univail, email: rteive@univali.br; 3 Univali, e-mail: Lucascarneirobjj@hotmail.com; 4 Univali, e-mail: jhonatanacacio@univali.br

Palavras-chave: previsão hidrológica; *Random Forest*; gestão de recursos hídricos.

Resumo

A previsão hidrológica de curto prazo constitui uma ferramenta relevante para a gestão de recursos hídricos, especialmente em regiões sujeitas à elevação rápida do nível dos rios e à ocorrência de eventos de inundação. No Vale do Itajaí, em Santa Catarina, a recorrência histórica de cheias evidencia a necessidade de métodos capazes de apoiar o monitoramento e a tomada de decisão em contextos de risco hidrológico. Nesse sentido, este trabalho avaliou a aplicação de um algoritmo de aprendizado de máquina supervisionado (*Machine Learning*) para previsão do nível de rio em horizonte de 24 horas, a partir da integração de dados hidrológicos e meteorológicos. A base de dados foi construída com informações de nível do rio obtidas junto à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico e dados meteorológicos disponibilizados pela EPAGRI, posteriormente tratados, agregados em escala diária e organizados em uma série unificada com aproximadamente dez anos de registros válidos. Foram desenvolvidas variáveis temporais associadas ao nível do rio, precipitação acumulada, defasagens, médias móveis, sazonalidade e indicadores meteorológicos. A modelagem foi conduzida de forma incremental, permitindo avaliar a contribuição de diferentes grupos de variáveis no desempenho preditivo. O modelo final apresentou coeficiente de determinação próximo de 0,86, erro médio absoluto de aproximadamente 9,4 cm e raiz do erro quadrático médio de aproximadamente 15,8 cm, correspondente a 8,58% da altura média observada do rio. Os resultados indicam que o algoritmo *Random Forest* apresentou desempenho satisfatório para previsão de curto prazo, acompanhando adequadamente a tendência geral da série. Entretanto, os maiores erros concentraram-se em períodos de maior volatilidade e eventos extremos, indicando limitações associadas ao uso de uma única estação meteorológica e à baixa representação espacial da bacia. Conclui-se que a abordagem proposta possui potencial como ferramenta auxiliar à gestão hídrica, embora melhorias futuras devam considerar múltiplas estações hidrometeorológicas, dados a montante e informações meteorológicas previstas.

Introdução

A previsão de nível de rio é um problema de grande importância na gestão de recursos hídricos, visto que eventos hidrometeorológicos extremos representam uma grande ameaça à segurança da população. Conforme apresentado pela United Nations Office for Disaster Risk Reduction, entre 1970 e 2019, desastres relacionados à água foram responsáveis por 50% dos desastres e 45% de todas as mortes reportadas; desde 2000, o número de desastres relacionados a enchentes cresceu 134% em comparação às duas décadas anteriores.

A cidade de Itajaí/SC, onde está situada a instituição de ensino Universidade do Vale do Itajaí, localiza-se no Vale do Itajaí-Açu, região historicamente afetada por eventos hidrológicos extremos e que até hoje busca mitigar seus efeitos. Xavier, Barcellos e Freitas (2014), ao analisarem o desastre de 2008 em Santa Catarina, destacam que os efeitos imediatos representam apenas a parte mais visível dos impactos, os quais expressam vulnerabilidades sociais, ambientais e institucionais. Por isso, a previsão hidrológica de curto prazo é uma ferramenta necessária para sistemas de alerta e apoio à tomada de decisão, já que permite antecipar variações e aumentar o tempo hábil para a execução de ações de prevenção ou contenção (MOORE; BELL; JONES, 2005; GUO; CHEN; CHANG, 2023; KAUR; CHAVAN, 2025).

Modelos tradicionais apresentam limitações devido à complexidade da modelagem e à interdependência de variáveis, precisam ser calibrados com base em dados de vazão e podem depender de pesquisas de campo intensivas para atingir boa qualidade de resultados, além de estarem associados a alta demanda computacional (SUN et al., 2017). Nesse contexto, modelos orientados por dados, como os algoritmos de aprendizado de máquina, apresentam-se como alternativas complementares para previsão de curto prazo, especialmente quando há séries históricas hidrológicas e meteorológicas disponíveis.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo computacional leve e eficiente capaz de prever o nível do rio no dia seguinte, utilizando como entradas valores atuais e históricos de uma única estação hidrológica e de uma única estação meteorológica. Também busca identificar as variáveis mais relevantes que compõem o problema e integrar dados meteorológicos e hidrológicos em uma planilha unificada.

Materiais e Métodos

A base de dados foi montada a partir da união de dados meteorológicos disponibilizados pela EPAGRI de Itajaí e dados hidrológicos disponibilizados pela ANA de Ilhota. A localização geográfica das estações está apresentada na Figura 01. Antes da unificação, ambos os conjuntos de dados passaram por pré-processamento, sendo excluídas as linhas com valores inválidos, como “-9999”, e linhas com dados faltantes, salvo nos casos em que o valor nulo indicava 0, como para precipitação e radiação.

Os dados das agências apresentavam diferentes escalas temporais, sendo os dados da ANA diários e os dados da EPAGRI horários. Para a unificação, os dados da EPAGRI foram transformados para a escala diária, por meio de médias ou agregações para as variáveis. Após todo o pré-processamento, a planilha final ficou com aproximadamente 10 anos de dados, 3700 entradas diárias com valores meteorológicos válidos e níveis de rio representados.

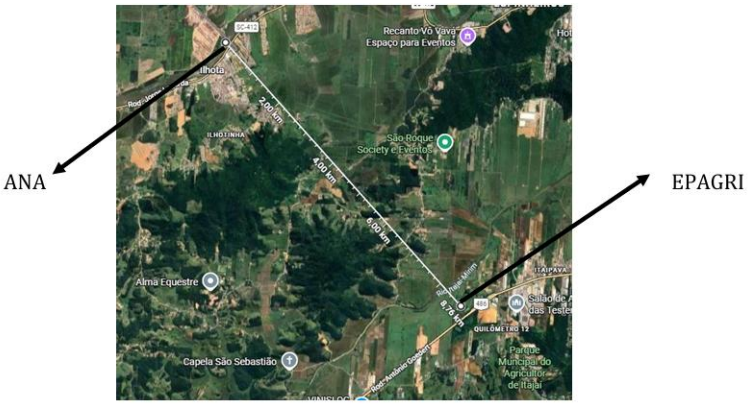


Figura 01: Posição geográfica de coleta das estações.
Fonte: Autor (2026)

Antes de iniciar as análises, uma revisão bibliográfica foi realizada a fim de selecionar o método de IA e analisar como as variáveis eram tratadas. Esta busca está representada na Tabela 01. Após verificação da literatura, o algoritmo *Random Forest* foi selecionado como modelo preditor devido à sua robustez e ampla aceitação. A escolha considerou sua capacidade de representar relações não lineares, lidar com múltiplas variáveis explicativas e permitir a análise da importância relativa das entradas do modelo. Além da metodologia, a revisão indicou que variáveis temporais, como agregados e defasagens, eram necessárias para que o modelo apresentasse boa acurácia.

Autor	Métodos utilizados	Saída
Sapitang et al. (2020)	BDTR, **DFR**, BLR, NNR	Nível do reservatório para 1 a 7 dias à frente.
Şen (2025)	*Linear Regression, Decision Tree,* ***Random Forest****, XGBoost*	Nível diário do reservatório.
Zhang et al. (2026)	LR, GBR, ANN, **RF**, ETR, XGB, LSTM	Vazão diária no exutório.
Jesus et al. (2025)	Discute MLP, LSTM, SVM, RF e ELM.	Vazão do rio para 1, 2 e 3 dias.
Kaur e Chavan (2025)	LSTM, Bi-LSTM, GRU, Bi-GRU, CNN, WaveNet, KNN, RF, SVR, *AdaBoost, XGBoost*	Vazão do rio com 1 dia de antecedência.
Islam et al. (2025)	SVR, **RFR**, PR, MLPR, LR, DTR, XGBMR, LGBMR, ER	Nível máximo e mínimo mensal do rio.

Tabela 01: Resultados da revisão bibliográfica.
Fonte: Autor (2026)

De modo a atender aos objetivos da pesquisa e manter coerência com o estado da arte, a variável de saída escolhida foi o nível do rio no dia seguinte, representada por N(t+1). Assim, dadas as entradas do dia atual e dos dias anteriores, definiu-se um horizonte temporal de 24 horas. Para a análise inicial, a divisão de treino e teste foi padronizada em 80/20, de modo cronológico, para a validação final. Como métricas de desempenho, foram adotados o coeficiente de determinação (R^2), o erro médio absoluto (MAE) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE).

Com a noção de que variáveis de defasagem, médias e agregados eram importantes devido à dependência temporal do problema, um pós-processamento foi aplicado à base de dados. Foram geradas variáveis como médias de 3, 7 e 14 dias, atrasos de 1, 2 e 3 dias e diferença de 1 dia para o nível do rio; chuvas com acumulados de 3, 7 e 14 dias, defasagens de 1, 2 e 3 dias e índice de memória de chuva, conforme a Equação (01); médias, mínimas e máximas de umidade e temperatura; além de radiação, pressão atmosférica e velocidade do vento.

$$I(t) = 1{,}0 \cdot P(t) + 0{,}7 \cdot P(t-1) + 0{,}4 \cdot P(t-2) + 0{,}2 \cdot \left(A^7(t) - A^3(t)\right) + 0{,}1 \cdot \left(A^{14}(t) - A^7(t)\right) \quad (01)$$

Os primeiros modelos testados apresentavam grande dependência da variável de nível do rio do dia anterior, chamada de N(t). A variável, de forma isolada, detinha $R^2 \approx 0{,}77$. Para avaliar a contribuição de diferentes grupos de variáveis, foi utilizada uma modelagem incremental, na qual cada modelo adicionava progressivamente um novo grupo de variáveis. O processo iniciou-se com o nível do rio e seguiu, respectivamente, com métricas de precipitação, avaliações temporais e, por último, dados meteorológicos diversos, como radiação, umidade relativa, temperatura, pressão atmosférica e vento. Por fim, foi considerado um modelo enxuto com somente as 6 principais variáveis. Todos estes modelos estão dispostos no fluxograma da Figura 02.

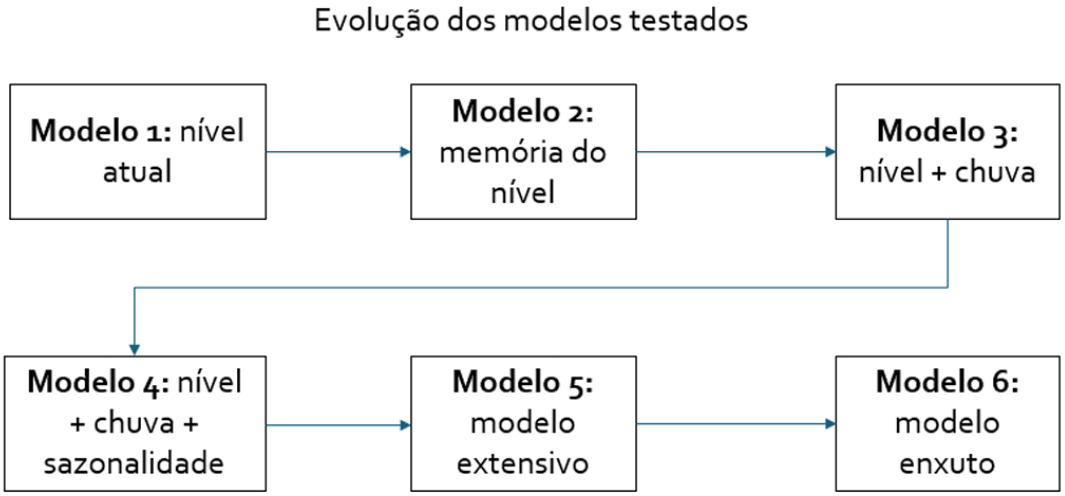


Figura 02: Fluxo de desenvolvimento dos modelos.
Fonte: Autor (2026)

A comparação entre os modelos permitiu identificar, de modo individualizado, o ganho associado à inclusão progressiva de cada grupo de variáveis. A Tabela 02 apresenta os resultados obtidos para cada configuração, permitindo verificar a evolução do desempenho em relação ao modelo inicial.

Modelo	R^2	MAE (cm)	RMSE (cm)
M1	0,7772	11,389	19,256
M2	0,8144	10,884	17,578
M3	0,8365	9,5446	16,496
M4	0,8384	9,6751	16,403
M5	0,8502	9,4235	15,793
M6	0,8431	9,2527	16,163

Tabela 02: Resultado dos modelos.
Fonte: Autor (2026)

A partir da comparação incremental, o Modelo 5 foi selecionado como configuração base para a etapa de ajuste de hiperparâmetros. Os hiperparâmetros considerados para a otimização foram: número de estimadores, número mínimo de amostras por folha, profundidade máxima, número mínimo de divisões e número máximo de amostras. A Figura 03 apresenta o número mínimo de amostras por folha e o número de estimadores; a Figura 04 apresenta a profundidade máxima e o número mínimo de divisões; e a Figura 05 apresenta o número máximo de amostras. A otimização também considerou o tempo necessário para cada iteração, uma vez que o foco do trabalho é garantir um modelo leve e rápido, esta análise esta apresentada como a linha pontilhada e utiliza o eixo secundário em segundos como base.

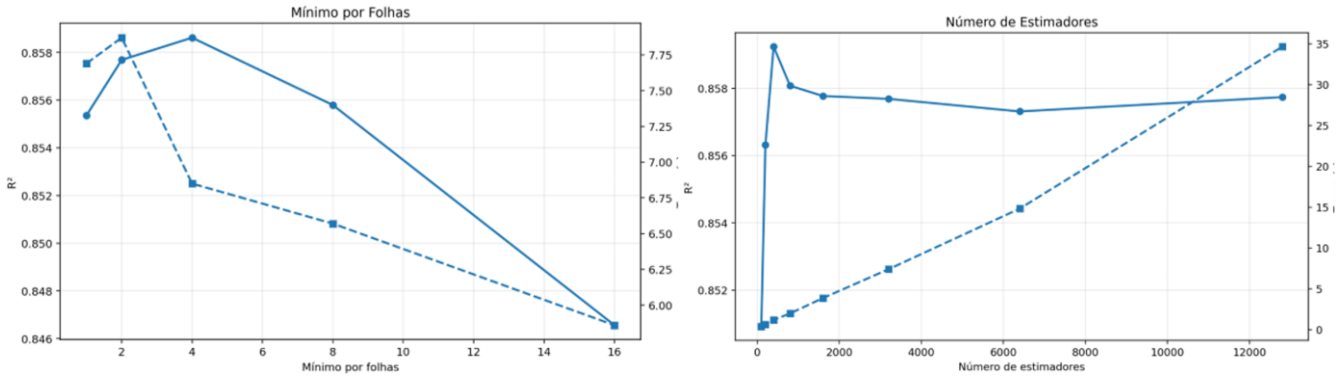


Figura 03: Otimização do número mínimo de amostras por folha e estimadores.
Fonte: Autor (2026)

Para a análise de hiperparâmetros, os gráficos utilizaram R^2 como métrica. O número mínimo de amostras por folha apresentou valor ótimo igual a 4, enquanto o número de estimadores apresentou valor ótimo igual a 400. O número mínimo de amostras por folha tem relação inversa com o tempo computacional, enquanto o número de estimadores tem relação direta. Para ambos, o ganho de tempo foi considerado aceitável em relação ao ganho de precisão, sendo mantidos no modelo final.

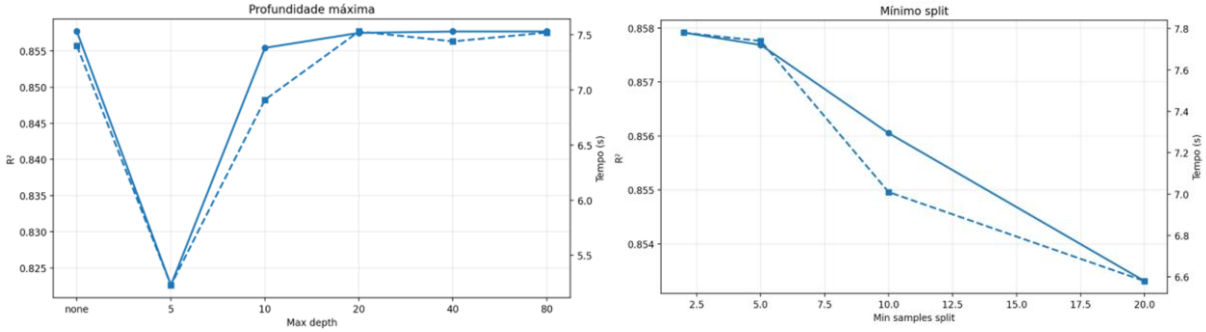


Figura 04: Otimização profundidade máxima e número mínimo de divisões. Fonte: Autor (2026)

O Modelo 5 apresentou valores iguais de R^2 para profundidade máxima de 40, 80 e sem restrição de profundidade máxima. Desse modo, é perceptível que, quando sem restrição, a profundidade se mantém entre 20 e 40; portanto, não foi adotada restrição de profundidade no modelo. O número mínimo de divisões foi mantido como padrão em 2.

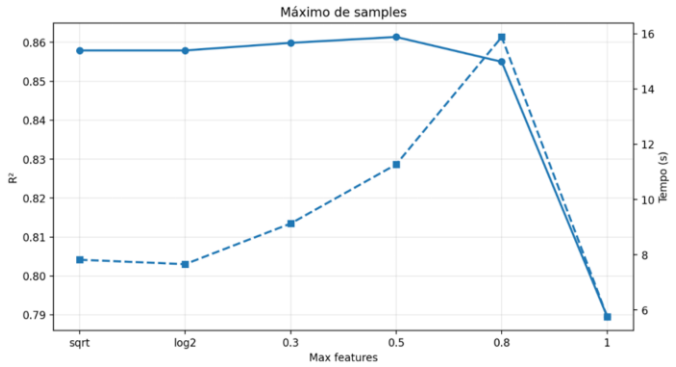


Figura 05: Otimização número máximo de amostras. Fonte: Autor (2026)

O número máximo de amostras selecionado foi de 0,3; esse valor apresentou ganho considerável sem grande acréscimo de tempo computacional associado. Desse modo, os hiperparâmetros selecionados foram: número mínimo de amostras por folha igual a 4, número de estimadores igual a 400, sem profundidade máxima, número mínimo de divisões igual a 2 e número máximo de amostras igual a 0,3. Com esses valores, o Modelo 5 foi rodado novamente, resultando em $R^2 = 0{,}8602$ e tempo de simulação inferior a 5 segundos.

Na tentativa de melhorar ainda mais o modelo, testes alternativos foram realizados, como: utilizar o algoritmo Extra Trees em vez do algoritmo *Random Forest*, utilizar correção de resíduos, utilizar uma análise bimodal, testar diferentes divisões dos dados (70/30; 75/25; 80/20), aplicar k-fold e divisões aleatórias e, por fim, alterar o alvo de nível do rio no dia seguinte para delta de nível do rio entre o dia atual e o dia seguinte. Os resultados estão apresentados na Tabela 03. No fim, nenhum valor apresentou ganho expressivo, mas é interessante notar que, utilizando o algoritmo *Random Forest* e alterando a métrica para delta (t+1), as variáveis mais importantes se tornam chuva e radiação. Esse resultado está alinhado com o estado da arte e será retomado nas considerações finais.

Código	Estratégia	Variável Alvo	Divisão dos Dados	Algoritmo	Descrição	R^2
C1	Correção de resíduos	Nível (t+1)	80/20 Cronológico	RF + RF (resíduos)	Modelo base + segundo modelo para prever o erro	0,850295
E1	Extra Trees	Nível (t+1)	80/20 Cronológico	*ExtraTrees*	Troca do algoritmo mantendo as variáveis do Modelo 5	0,853278
D1	RF em delta	Delta (t+1)	80/20 Cronológico	*Random Forest*	Troca do alvo de nível absoluto para variação diária	0,861176
D2	RF em delta	Delta (t+1)	20 divisões aleatórias	*Random Forest*	Mesmo modelo em delta com reamostragem aleatória repetida	0,859123

Tabela 03: Modelagens Alternativas.
Fonte: Autor (2026)

Os modelos testados tiveram, em sua melhor condição, ganhos muito superficiais para a previsão. Dessa forma, para manter o trabalho coerente com o objetivo, o Modelo 5 foi mantido. Como o modelo era razoavelmente extenso, foi conduzida uma análise de importância de cada variável interna. Na Figura 06, estão apresentados somente os 15 primeiros fatores, uma vez que após a décima quinta variável, o modelo apresentou saturação, sem ganho relevante de R^2, MAE e RMSE.

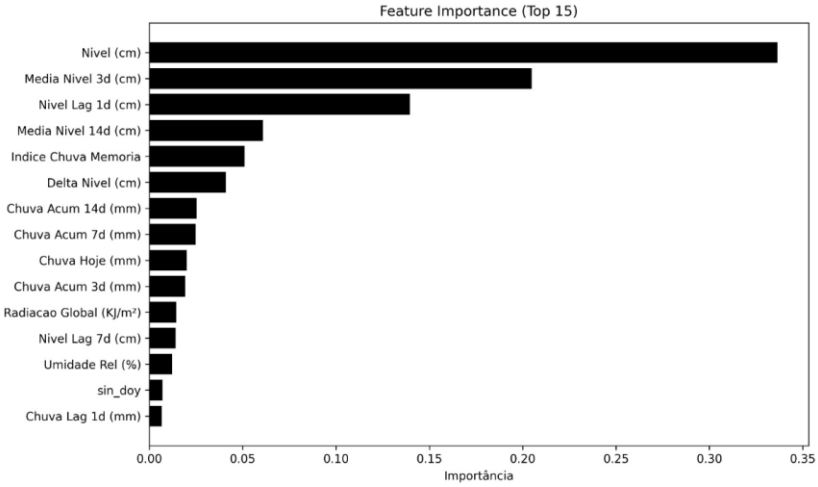


Figura 06: Importância de variáveis do modelo 5.
Fonte: Autor (2026)

Após todas as análises, o Modelo 5, somente com variáveis significativas, foi selecionado como final, e seus resultados serão os únicos discutidos durante o trabalho. É notável a dependência do modelo em variáveis de nível e seus agregados, sendo a primeira variável não hidrológica o índice de memória de chuva, na quinta posição.

Resultados e discussão

O modelo apresentou $R^2 \approx 0{,}86$, RMSE ≈ 15,8 cm e MAE ≈ 9,4 cm. Considerando a altura média do rio durante todo o período como de 184 cm, o RMSE correspondeu a 8,58% da média da série, valor que será utilizado no comparativo preliminar com a literatura. A boa aderência do modelo pode ser verificada no gráfico de teste de nível real comparado com a previsão, apresentado na Figura 07.

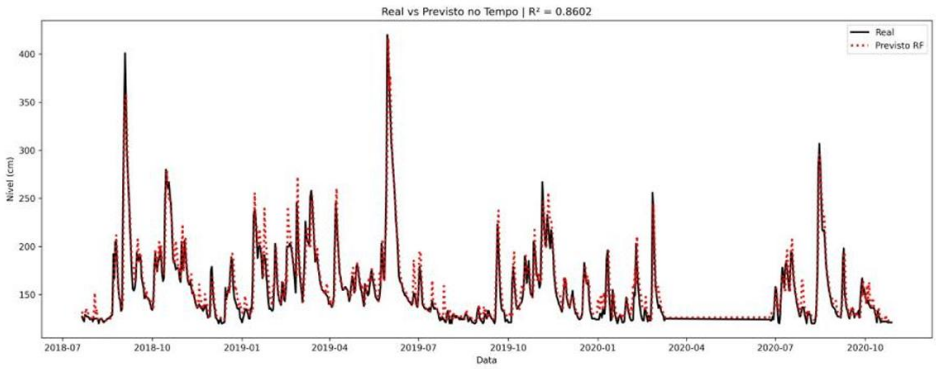


Figura 07: Comparação temporal entre nível real e previsto.
Fonte: Autor (2026)

O gráfico de análise temporal expõe tanto os pontos positivos quanto negativos do modelo. O modelo apresenta boa aderência à tendência média e prevê bem a direcionalidade do nível do rio; porém, em períodos de elevada variabilidade hidrológica, apresenta atraso temporal na resposta, o que gera erros consideráveis. Para melhor verificação, dois momentos foram selecionados, sendo respectivamente a maior cheia e a maior divergência do modelo, nas datas de 2019 e 2018. Essa análise está apresentada na Figura 08.

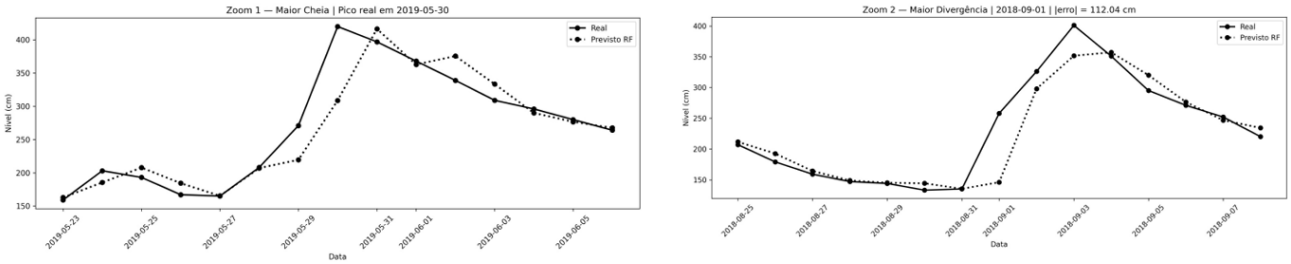


Figura 08: Detalhe de maior cheia e maior erro.
Fonte: Autor (2026)

Uma vez que momentos de alta volatilidade são a exceção e não a regra, os resíduos de erro do modelo ficaram concentrados próximos à média, com poucos momentos de erro excessivo, como evidenciado na Figura 09. Os valores de resíduos se mantêm em torno de 20 cm, com valores discrepantes superando 1 m em duas situações.

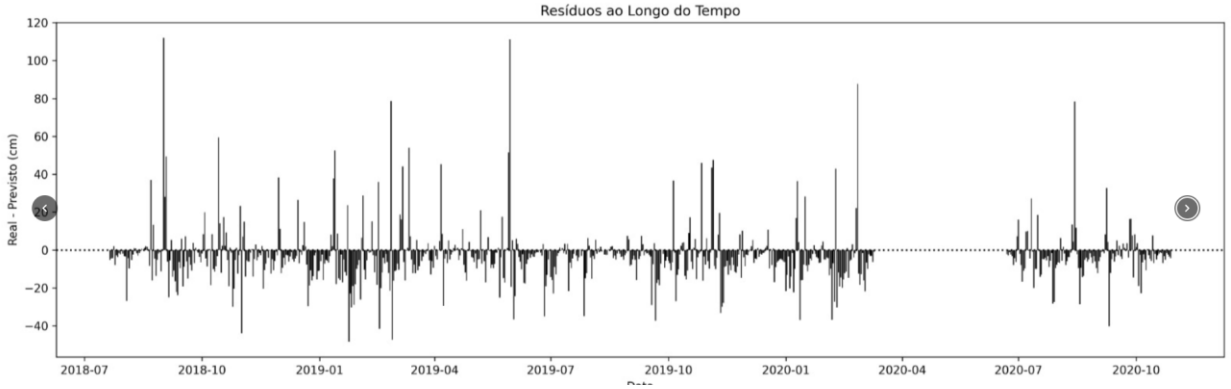


Figura 09: Distribuição de resíduo de erros no tempo. Fonte: Autor (2026)

A análise de discrepância pode ser complementada observando o histograma de erro juntamente com o erro por dia, apresentados na Figura 10. Isso demonstra uma dificuldade do modelo com eventos extremos ou de rápida variação do nível.

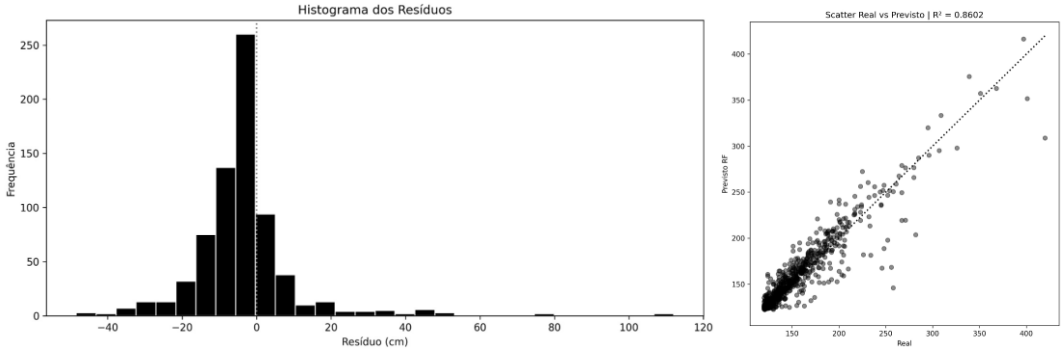


Figura 10: Histograma e dispersão de erro. Fonte: Autor (2026)

Para uma verificação mais adequada, um comparativo preliminar com a literatura foi desenvolvido. Para a análise, foi selecionado o artigo de Guo et al. (2021), no qual se avalia o comportamento de três rios em curto prazo em uma área subtropical de Taiwan, usando somente uma estação meteorológica para cada corpo hídrico, de modo semelhante ao presente artigo. A diferença principal está no escopo temporal, de 1 h e 6 h. Os valores de RMSE e RMSE relativos à média estão dispostos na Tabela 04.

Estudo	Média da série	RMSE	RMSE relativo à média
Autor (24h)	184 cm	15,8 cm	8,58%
Lanyan (1h)	339 cm	3 cm	0,88%
Lanyan (6h)	339 cm	16 cm	2,65%
Simon (1h)	480 cm	2 cm	0,42%
Simon (6h)	480 cm	10 cm	2,08%
Kavalan (1h)	68 cm	2 cm	2,94%
Kavalan (6h)	68 cm	8 cm	11,76%

Tabela 04: Comparativo preliminar com a literatura. Fonte: Autor (2026)

Com o comparativo preliminar desenvolvido, o resultado pode ser avaliado: um erro de 8,6% para um período de 24 horas, sobre um rio de nível médio de 184,05 cm, apresenta ordem de grandeza compatível com estudos semelhantes, considerando as diferenças de bacia, escala temporal e variáveis de entrada. Em Guo et al. (2021), os erros de 11,76%, 2,08% e 2,65% são referentes a períodos de um quarto do escopo temporal avaliado no presente artigo.

Considerações Finais

O modelo apresenta limitações, principalmente devido ao uso de uma única estação meteorológica. Nesse contexto, os dados de radiação, utilizados como análogo para evaporação, e os dados de precipitação ficam incompletos e não descrevem integralmente o sistema. Essa exclusividade de estação faz com que o modelo seja dependente do nível do rio e de suas variações temporais, o que contribui para sua dificuldade em lidar com eventos extremos, justamente um dos focos do trabalho. Apesar

dessas limitações, o presente artigo traz uma base de dados robusta e uma análise consistente de entradas, com método incremental que permite explorar separadamente cada subgrupo de variáveis de entrada, além de um comparativo entre modelos e com a literatura, resultando em um modelo com aplicabilidade prática. Em suma, o modelo montado é eficaz para a previsão em curto prazo, com RMSE relativo à média da altura do rio de 8,6%. A estrutura de IA selecionada, o algoritmo *Random Forest*, é adequada ao problema, e os resultados sugerem que novos ganhos de desempenho dependem da incorporação de informações espaciais adicionais; assim, o artigo apresenta resultado alinhado com a literatura atual. Para trabalhos futuros, sugere-se utilizar diversas estações hidrológicas e meteorológicas e ponderá-las com pesos de acordo com seu impacto, além do uso de previsões do tempo para expandir o horizonte temporal e aumentar a precisão do modelo. Também se prevê a utilização extensiva das estações meteorológicas e hidrológicas a montante do ponto de análise dentro da bacia do rio Itajaí-Açu.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à FAPESC e à Universidade do Vale do Itajaí pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

GUO, Wen-Dar; CHEN, Wei-Bo; YEH, Sen-Hai; CHANG, Chih-Hsin; CHEN, Hongey. Prediction of river stage using multistep-ahead machine learning techniques for a tidal river of Taiwan. *Water*, v. 13, n. 7, art. 920, 2021. DOI: 10.3390/w13070920.

GUO, Wen-Dar; CHEN, Wei-Bo; CHANG, Chih-Hsin. Error-correction-based data-driven models for multiple-hour-ahead river stage predictions: a case study of the upstream region of the Cho-Shui River, Taiwan. Journal of Hydrology: Regional Studies, v. 47, art. 101378, 2023. DOI: 10.1016/j.ejrh.2023.101378.

ISLAM, Md Touhidul et al. Comparative evaluation of machine learning models for extreme river water level forecasting in Bangladesh: implications for flood and drought resilience. Progress in Disaster Science, v. 27, art. 100449, 2025. DOI: 10.1016/j.pdisas.2025.100449.

JESUS, Gonçalo; MARDANI, Zahra; ALVES, Elsa; OLIVEIRA, Anabela. Deep learning-based river flow forecasting with MLPs: comparative exploratory analysis applied to the Tejo and the Mondego Rivers. *Sensors*, v. 25, n. 7, art. 2154, 2025. DOI: 10.3390/s25072154.

KAUR, Sukhsehaj; CHAVAN, Sagar Rohidas. Comparative analysis of deep learning and machine learning models for one-day-ahead streamflow forecasting in the Krishna River basin. Journal of Hydrology: Regional Studies, v. 60, art. 102549, 2025. DOI: 10.1016/j.ejrh.2025.102549.

MOORE, Robert J.; BELL, Victoria A.; JONES, David A. Forecasting for flood warning. *Comptes Rendus Geoscience*, v. 337, n. 1-2, p. 203-217, 2005. DOI: 10.1016/j.crte.2004.10.017.

SAPITANG, Michelle; RIDWAN, Wanie M.; KUSHIAR, Khairul Faizal; AHMED, Ali Najah; EL-SHAFIE, Ahmed. Machine learning application in reservoir water level forecasting for sustainable hydropower generation strategy. *Sustainability*, v. 12, n. 15, art. 6121, 2020. DOI: 10.3390/su12156121.

ŞEN, Senem Güneş. Machine learning-based water level forecast in a dam reservoir: a case study of Karaçomak Dam in the Kızılırmak Basin, Türkiye. *Sustainability*, v. 17, n. 18, art. 8378, 2025. DOI: 10.3390/su17188378.

SUN, W. et al. Physically based distributed hydrological model calibration based on a short period of streamflow data: case studies in four Chinese basins. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, p. 251-265, 2017. DOI: 10.5194/hess-21-251-2017.

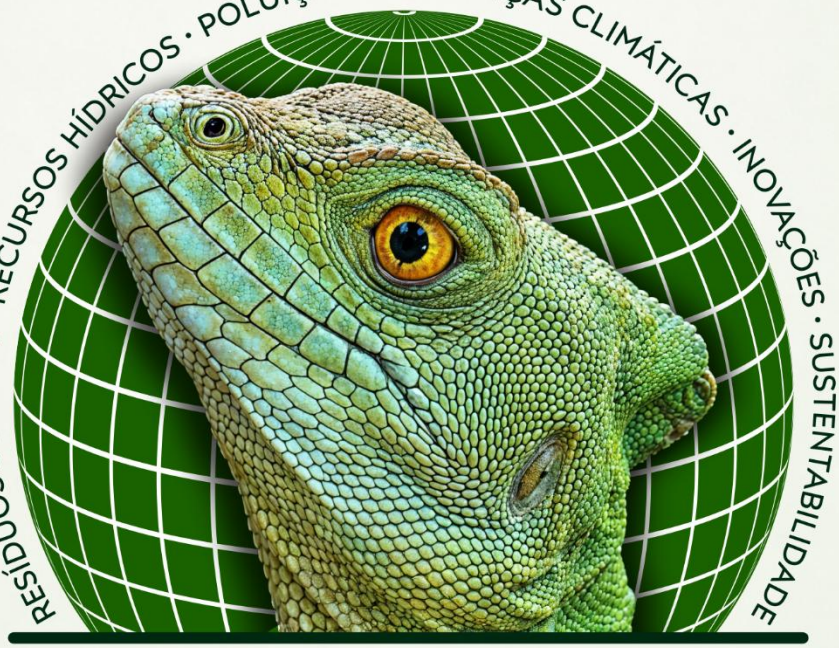
UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION. GAR 2025 Hazards: Floods. Geneva: UNDRR, 2025. Disponível em: https://www.undrr.org/gar/gar2025/hazard-exploration/floods. Acesso em: 3 maio 2026.

XAVIER, Diego Ricardo; BARCELLOS, Christovam; FREITAS, Carlos Machado de. Eventos climáticos extremos e consequências sobre a saúde: o desastre de 2008 em Santa Catarina segundo diferentes fontes de informação. *Ambiente & Sociedade*, São Paulo, v. 17, n. 4, p. 273-294, 2014. DOI: 10.1590/1809-4422ASOC1119V1742014.

ZHANG, Zhi et al. Comparative assessment of machine learning models for daily streamflow prediction in a subtropical monsoon watershed. *Scientific Reports*, v. 16, art. 7341, 2026. DOI: 10.1038/s41598-026-38969-8.

ÁREA TEMÁTICA 16

JUSTIÇA CLIMÁTICA E DIREITOS HUMANOS AMBIENTAIS



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

DIREITOS HUMANOS, JUSTIÇA ENERGÉTICA E CLIMÁTICA E OS COMPROMISSOS COM OS ODS 2030 E LIMITES PLANETÁRIOS

1 Mauro D.Berni, 2 Amasa F.Carvalho, 3 Sofia D. S.Bernardino, 4 Luiz Gustavo A.Souza, 5 Sônia R. Cal Seixas
1,2,4,5, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético, NIPE, CP2B, UNICAMP
3 doutoranda, Núcleo de Estudos e Pesquisas Ambientais, NEPAM/IFCH/UNICAMP
1 mberni@unicamp.br, 2 amasafc@unicamp.br, 3 s245780@dac.unicamp.br, 4 lgasouza@unicamp.br, 5 srcal@unicamp.br

Palavras-chave: Consumo de Energia; Ações Climáticas; Desigualdades Sociais-Econômicas-Ambientais.

Resumo

As alterações climáticas representam um problema global. Abordar essa temática é um dos elementos essenciais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), visto que os limites planetários estão sendo alcançados antes do previsto. Este quadro afeta diretamente a efetivação equitativa dos direitos humanos, especialmente no que se refere ao acesso à justiça energética e climática. O Acordo de Paris (2015) é fundamental para a legislação de direitos humanos ao destacar a necessidade de enfrentar os riscos climáticos em nível global. Nesse sentido, a Resolução 48/13 do Conselho de Direitos Humanos da ONU, publicada em 2021, argumenta que o cumprimento das expectativas do Acordo de Paris é uma exigência legal dos direitos humanos, impondo aos Estados a responsabilidade de agir em conformidade com o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado. Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo principal realizar, por meio de uma análise crítico-dedutiva fundamentada em referencial bibliográfico, uma reflexão sobre o direito humano ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, abordando a justiça energética e a justiça climática como dimensões essenciais para a compreensão e o enfrentamento das desigualdades sociais.

Introdução

No contexto dos direitos humanos, a justiça energética e a climática reconhecem que a transição energética e os impactos das mudanças climáticas podem afetar de forma desproporcional os grupos mais vulneráveis da sociedade, notadamente em países do Sul Global.

A transição para um modelo energético com variáveis de contorno que internalizam a justiça climática deve garantir a todos, especialmente aos mais vulneráveis, o acesso equitativo aos benefícios e a partilha justa dos custos. Isso assegura direitos humanos fundamentais, como o direito a um ambiente sadio, à alimentação adequada e a um futuro digno, mediante a participação ativa nos processos de decisão.

Neste cenário, a transição energética justa e a emergência climática impuseram uma nova pauta às relações internacionais, induzindo políticas que conciliem campos de saberes diversos — como o direito, os estudos energéticos e as dimensões econômica, política e social. Tais políticas precisam modular múltiplos interesses e reivindicações, equacionando de forma equitativa as necessidades das presentes e futuras gerações e, de forma mais ampla, a própria conservação da vida humana e não humana no planeta (DE ASSIS et al., 2024).

Este trabalho procura demonstrar o papel imprescindível das políticas públicas para alavancar a justiça energética e climática, considerando os compromissos dos ODS da ONU e os Limites Planetários. Para tanto, as políticas públicas devem estruturar-se em três eixos fundamentais: i) Eixo Distributivo, que garante o acesso universal à energia limpa e a um meio ambiente equilibrado; ii) Eixo Social, focado na justiça climática por meio da inclusão e proteção das comunidades vulneráveis; e iii) Eixo Procedimental, que assegura a participação democrática e deliberativa nas decisões.

A integração entre a oferta de energia acessível, a proteção social e a soberania participativa constitui o pilar central para uma transição equitativa, essencial para países do Sul Global, como o Brasil.

Metodologia

Metodologicamente são analisados os procedimentos regulatórios, motivacionais e as barreiras a serem vencidas, com o propósito de, posteriormente, indicar recomendações de políticas públicas. Neste sentido, a metodologia incluiu quatro etapas principais: (1) identificar as fontes para a busca bibliográfica, (2) definir termos de busca apropriados, (3) definir critérios de seleção e (4) extrair e sintetizar dados (Figura 1).

Para o período de análise 2020 a 2025, observou-se que a energia da biomassa emergiu como uma fonte vital de energia renovável na transição global para o desenvolvimento sustentável, alinhando-se com os ODS (SDG) das Nações Unidas, particularmente o ODS 7 (energia acessível e limpa) e o ODS 13 (ação climática).

A Figura 2 mostra o resultado da análise bibliométrica realizada com o software VOSviewer, utilizando direitos humanos, justiça energética, justiça climática e os compromissos e aderência com os ODSs 2030 e os limites planetários.

O VOSviewer é um software gratuito que permite ao usuário criar e analisar redes bibliométricas usando dados de buscas em grandes bases de dados, como o Scopus e *Web of Science*. A análise foi realizada por meio da condução de três etapas principais, conforme mostrado na Figura 2.

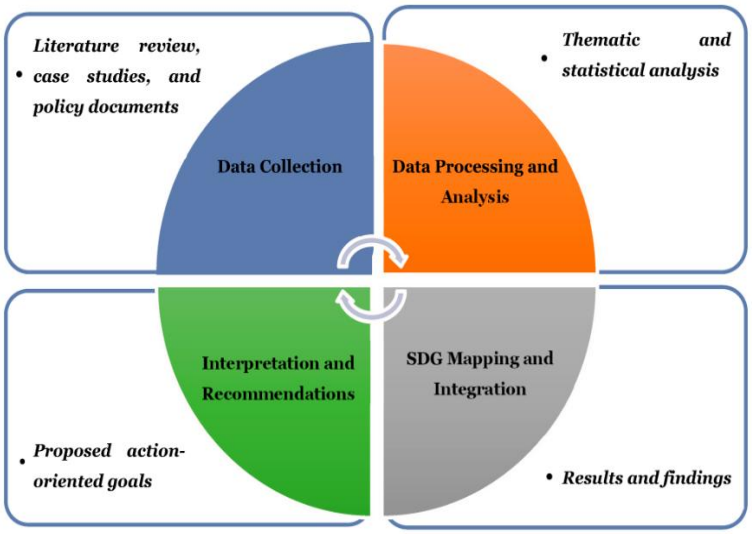


Figura 1: As etapas específicas adotadas na revisão bibliográfica.
Fonte: Mensah e Yankson, 2025.

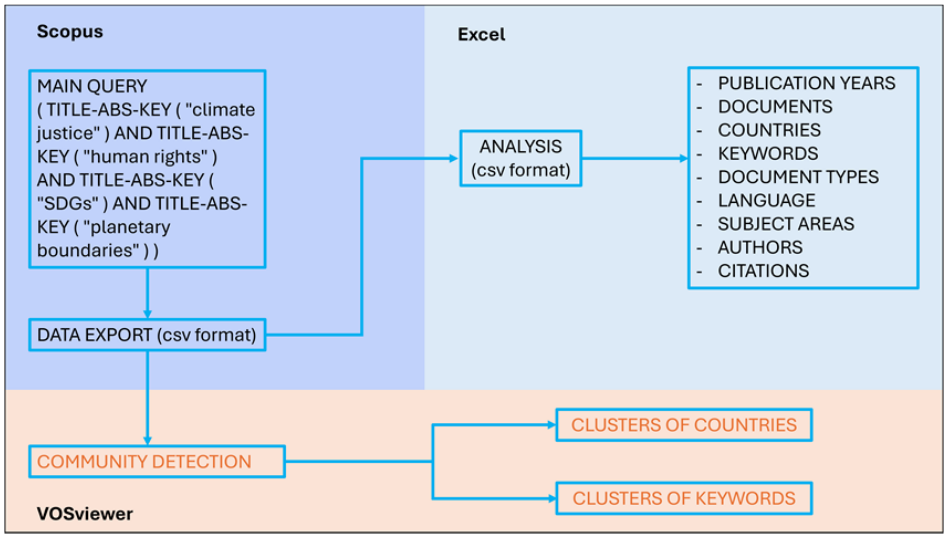


Figura 2: Estrutura metodológica da análise bibliométrica.

A Figura 2 ilustra o processo bibliométrico desenvolvido para a análise das palavras-chave selecionadas - justiça climática, direitos humanos, Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e limites planetários. A coleta de dados foi realizada na base Scopus, utilizando uma busca combinada aplicada aos títulos, resumos e palavras-chave (TITLE-ABS-KEY). O conjunto de dados resultante foi exportado em formato CSV para posterior análise quantitativa e relacional

Na segunda etapa, os dados foram organizados no Excel para uma avaliação descritiva que incluiu anos de publicação, tipos de documentos, países, idiomas, áreas temáticas, autores e citações. Em seguida, os dados foram importados para o VOSviewer, onde foi realizada a análise de clusters (detecção de comunidades), permitindo o agrupamento de países e palavras-chave e a identificação de padrões de colaboração e coocorrência. Essa abordagem combinada oferece uma compreensão estrutural e temática do campo de pesquisa.

Complementarmente, foi realizada uma revisão bibliográfica extensa e a compilação de informações de estudos, análises estatísticas, bancos de dados e publicações sobre a temática no Brasil e no exterior. A principal fonte de dados foi o banco de dados de publicações acessado por meio do Portal de Periódico da CAPES (www.periodicos.capes.gov.br), a partir de parâmetros de pesquisa baseado em palavras chaves afins ao tema. Bibliografias relacionadas à temática também são analisadas mais detalhadamente ou por meio da leitura de resumos disponíveis, para entender a magnitude e os reflexos na evolução do estado da arte da transição energética, justiça energética e climática.

Resultados e Discussão

Intersecção: direitos humanos, justiça energética e climática e os limites planetários

A intersecção entre direitos humanos, justiça energética, justiça climática e os ODS da Agenda 2030, à luz dos limites planetários, revela uma realidade complexa e interconectada. A busca por desenvolvimento sustentável deve necessariamente

abordar as desigualdades sociais e os impactos ambientais, reconhecendo que a exploração desenfreada dos recursos e a crise climática afetam desproporcionalmente as populações mais vulneráveis.

Os limites planetários (LPs) são uma estrutura científica, baseada em estudos do Centro de Resiliência de Estocolmo, Suécia, originalmente propostos por Rockström et al. (2009) e atualizados por Steffen et al. (2015), que definem os limites de pressão humana sobre os processos do sistema terrestre. Os LPs referem-se a nove processos considerados cruciais para a estabilidade e resiliência do planeta Terra, que regulam o clima, a química dos oceanos, a biodiversidade e os ciclos de nutrientes. Das ciências naturais às ciências sociais, dos riscos às soluções, da identificação dos limites planetários à gestão dos bens comuns globais, o Instituto Potsdam para Pesquisa de Impacto Climático (PIK) está avançando na fronteira da pesquisa integrada para a sustentabilidade global e para um futuro climático seguro e justo (PIK, 2025).

O novo relatório do PIK (2025) mostra que o planeta entrou em uma fase mais perigosa, revelando que alguns dos limites planetários já foram ultrapassados.

Em 2025, apenas dois dos nove Limites Planetários (LPs) permanecem dentro dos níveis seguros: i) aerossóis na atmosfera, referentes ao aumento de partículas suspensas (como fuligem e poeira) que alteram padrões climáticos regionais e afetam a saúde humana; e ii) camada de ozônio, cuja degradação estratosférica foi contida por ações internacionais e pela substituição dos clorofluorcarbonos (CFCs) (G1, 2025).Por outro lado, sete processos já ultrapassaram os limites de segurança (PIK, 2025; G1, 2025):Mudanças no uso da terra: compreendem o desmatamento e a conversão de ecossistemas naturais em áreas agrícolas ou urbanas, destruindo habitats e prejudicando a regulação climática. Mudanças climáticas: diretamente ligadas ao aumento da temperatura global pela emissão de gases de efeito estufa. Biodiversidade: refere-se à extinção de espécies causada pela degradação ambiental e exploração excessiva; este limite atingiu a zona de alto risco. Ciclos do nitrogênio e fósforo: decorrem do uso excessivo de fertilizantes, o que compromete a qualidade da água e os ecossistemas aquáticos, também em zona de alto risco. Uso de água doce: relacionado à crescente demanda hídrica, que atinge níveis críticos em diversas regiões. Poluição química (entidades novas): abrange o acúmulo de compostos tóxicos e microplásticos no ambiente, ameaçando a saúde humana e a fauna. Acidificação dos oceanos: causada pela absorção de CO_2 atmosférico, o que eleva a acidez das águas e prejudica a vida marinha, especialmente os recifes de corais. A Figura 3 ilustra os limites planetários que foram ultrapassados.

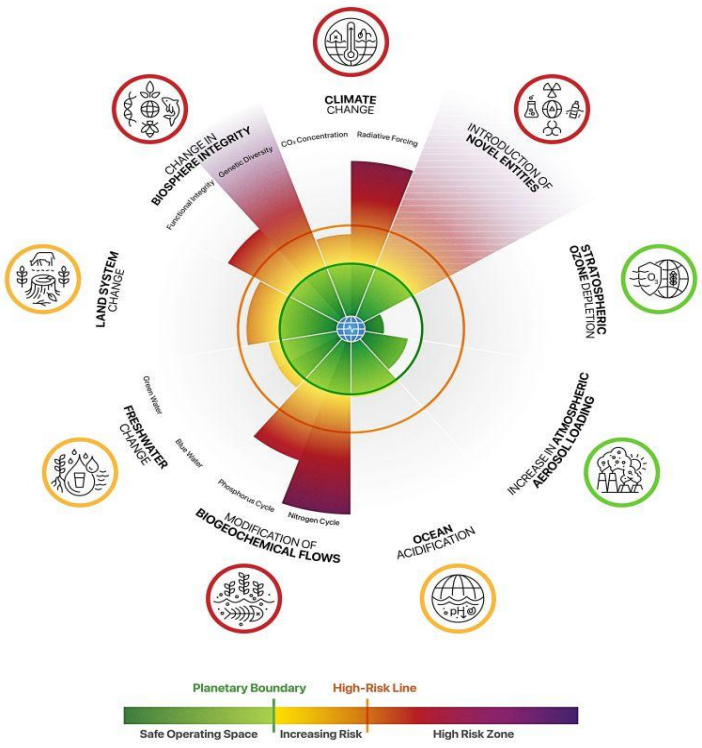


Figura 3: Representação visual dos limites planetários.
Fonte: Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK, 2025)

Justiça energética e garantia de acesso à energia limpa e acessível e um meio ambiente equilibrado

A garantia de acesso à energia limpa e acessível é o "eixo central" do ODS 7, enquanto um meio ambiente equilibrado e sustentável está aderente ao ODS 13 (ação climática). O objetivo principal é garantir que até 2030 todas as pessoas tenham acesso a serviços de energia modernos, confiáveis, sustentáveis e a preços acessíveis, promovendo o aumento de energias renováveis, melhoria da eficiência energética e um meio ambiente sustentável.

Conforme a Superintendência Geral de Desenvolvimento Econômico e Social (SGDES, 2025), energias limpas são as que não liberam, durante seu processo de produção ou de consumo, resíduos ou gases poluentes geradores de efeito estufa (GEE) e do aquecimento global, sendo fundamentais como fontes confiáveis e acessíveis de energia incluindo comunidades vulneráveis. A energia renovável pode ser obtida de fontes infinitas, casos da eólica, solar e biomassa.

Apesar dos pontos em comum, energia limpa e energia renovável não são sinônimos. Energias limpas e renováveis são termos frequentemente usados quando se refere a fontes de energia sustentável, mas elas possuem algumas diferenças importantes (MIT CLIMATE Portal, 2025). Energias limpas têm impacto ambiental muito pequeno, geralmente não emitindo poluentes prejudiciais, como o dióxido de carbono (CO_2). Isso inclui matrizes energéticas como a nuclear, que é livre de emissões, e gás natural quando equipado com tecnologia de captura de carbono. Já as energias renováveis são uma subcategoria das energias limpas e se referem a fontes que são naturalmente reabastecidas, como a energia solar, eólica, biomassa e hidroelétrica. Essas fontes são sustentáveis a longo prazo, pois não se esgotam com o uso. Embora sejam limpas, o termo "renovável" destaca sua capacidade de regeneração natural, o que as torna preferível para o processo de mitigação das mudanças climáticas e redução da dependência de combustíveis fósseis (BLOG KLANIN, 2025).

As energias limpas e renováveis trazem muitas vantagens para o planeta, na medida em que auxiliam a reduzir a poluição do ar, pois não emitem ou reduzem a difusão de GEE. Essas fontes de energia não dependem de recursos não renováveis, como petróleo e carvão. Isso significa que podem ter seus usos a longo prazo, reduzindo a pressão sobre os recursos naturais e diminuindo a instabilidade nos preços da energia, garantindo segurança energética de uma região ou país. Ao utilizar energias limpas e renováveis, preserva-se o meio ambiente, conserva a biodiversidade e minimizam os impactos das mudanças climáticas. Isso é essencial para garantir um planeta saudável e sustentável para as próximas gerações.

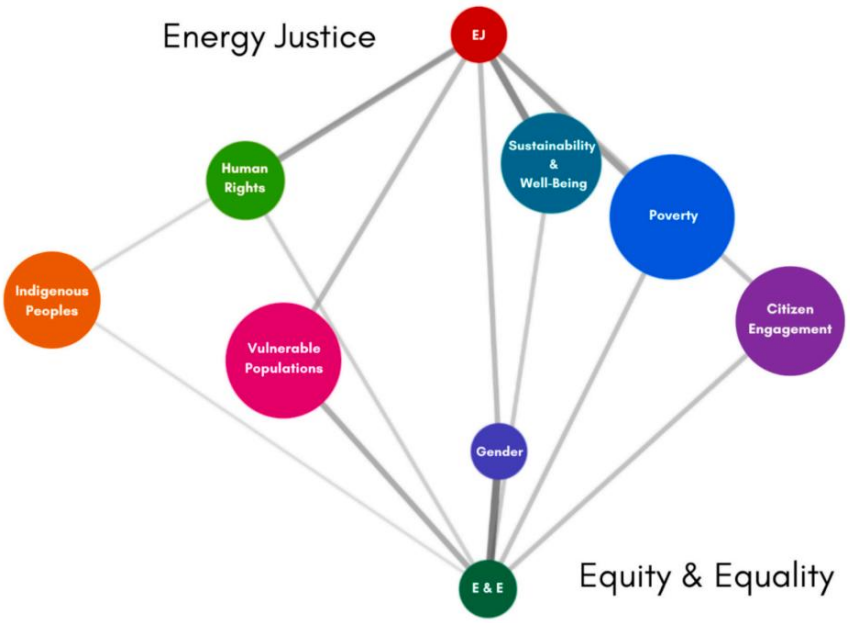


Figura 4: Conceitos entre os polos de Justiça Energética e Equidade e Igualdade.
Fonte: Wuebben et al. (2025)

Na Figura 4 as linhas mais grossas indicam que os conceitos de "Sustentabilidade e Bem-Estar" parecem mais alinhados com a JE do que com Equidade e Igualdade. Uma explicação segundo Wuebben et al. (2025) é que o desenvolvimento sustentável é frequentemente usado para enquadrar o processo de uma transição "justa". Enquanto isso, os conceitos de Povos Indígenas estavam mais alinhados com os Direitos Humanos e o Engajamento Cidadão, mais diretamente correlacionados com as menções à pobreza.

Justiça climática e inclusão social e proteção das comunidades vulneráveis

Conforme o *World Resources Institute* (WRI,2025), a justiça climática é uma abordagem ética e política que emerge como evolução da justiça ambiental, focando nas desigualdades sociais amplificadas pelas mudanças climáticas. Ela conecta os direitos humanos, a equidade e a sustentabilidade, propondo medidas para reduzir os impactos climáticos nos grupos mais expostos e vulnerabilizados, como as populações periféricas e povos indígenas. Esse conceito é sustentado por dimensões distributiva, de reconhecimento e procedimental, que orientam a identificação de riscos e benefícios no contexto climático.

O ano de 2024 terminou como o mais quente da história e o primeiro a ultrapassar 1,5°C de aumento na temperatura média do planeta em relação aos níveis pré-industriais (COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S), 2024).

No Brasil, ocorreram diversos eventos climáticos extremos, como as enchentes históricas que atingiram centenas de municípios no Rio Grande do Sul. Esse episódio ilustra o impacto das desigualdades socioeconômicas e raciais nas situações de desastre climático. De acordo com o WRI (2025) pesquisa realizada revelou que a população mais pobre, negra e com menor escolaridade foi a mais atingida. Quase metade (47%) das famílias que ganham até dois salários mínimos respondeu ter perdido

casa, móveis, eletrodomésticos ou o próprio sustento. Já entre aquelas que ganham de cinco a dez salários, só 13% relatam algum tipo de prejuízo. A proporção de pretos que relatou algum tipo de perda com as enchentes foi de 52%; entre os pardos, 40%; e entre os brancos, 26%.

Alguns dados de acesso a serviços básicos corroboram essa tendência. Embora representem 56% da população brasileira, pretos e pardos correspondem a 66% das pessoas sem acesso ao abastecimento de água. Já a população indígena é a mais impactada proporcionalmente, com 19 a cada 100 pessoas nessa situação. Mais de 70% das pessoas que vivem sem água tratada estão abaixo da linha da pobreza (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2024)

As mudanças climáticas aprofundam injustiças sociais, tornando urgente uma abordagem de justiça climática que considere tanto a intergeracionalidade quanto as desigualdades estruturais. Ainda conforme o WRI (2025), das 38 milhões de pessoas em situação de pobreza no Brasil, 27 milhões eram mulheres negras em 2020, evidenciando como fatores socioeconômicos e raciais influenciam a vulnerabilidade climática. Além disso, aponta que crianças nascidas em 2020 enfrentarão de duas a sete vezes mais eventos climáticos extremos do que aquelas nascidas em 1960. Em um cenário de aquecimento global de 3°C, uma criança de seis anos experimentará o dobro de incêndios florestais e ciclones tropicais, três vezes mais inundações fluviais, quatro vezes mais quebras de safra, cinco vezes mais secas e até 36 vezes mais ondas de calor. Esses dados reforçam a necessidade de políticas climáticas que integrem justiça social e intergeracionalidade, garantindo que as populações mais vulneráveis e as futuras gerações não sejam desproporcionalmente impactadas pela crise climática.

A justiça climática está também diretamente ligada à agenda de mitigação. Embora a redução de emissões seja essencial, políticas como a expansão de energias renováveis podem deslocar comunidades vulneráveis, por exemplo, enquanto a precificação do carbono pode onerar famílias de baixa renda. Para evitar tais desigualdades, é fundamental garantir participação comunitária, promover uma transição justa para trabalhadores e distribuir custos e benefícios de forma equitativa.

Para o Brasil, a justiça climática é um marco de justiça social e racial, reconhecendo desigualdades históricas e promovendo a participação das populações mais afetadas nos processos decisórios. O debate envolve questões como racismo ambiental, acesso a saneamento básico, moradia digna e água potável, além da luta pela demarcação de territórios indígenas e quilombolas. A justiça climática se materializa na governança brasileira por meio de políticas públicas, tais como o Plano Nacional de Mudança do Clima (Plano Clima) e a Estratégia Nacional de Mitigação e Adaptação, ambos liderados pelo Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima (CIM) que reconhecem e buscam enfrentar as desigualdades históricas, promovendo soluções para a crise climática que sejam sustentáveis, mas também inclusivas.

Participação democrática nas decisões

A participação democrática nas decisões é fundamental para garantir os direitos humanos, a justiça energética e a justiça climática, pois assegura que as vozes das populações mais afetadas por essas questões sejam ouvidas e suas necessidades consideradas. Ao incorporar a sociedade civil e os grupos vulneráveis nos processos de decisão, é possível buscar soluções mais equitativas e eficazes para as gerações atuais e futuras.

Apesar dos avanços, a participação popular ainda enfrenta obstáculos, como o enfraquecimento de mecanismos de controle social e a subordinação de interesses ambientais a interesses econômicos de curto prazo. Por isso, é essencial reforçar a participação social para assegurar que a transição energética e o desenvolvimento sustentável sejam verdadeiramente inclusivos e respeitem os direitos de todos. A busca por uma democracia mais completa e inclusiva, que garanta a justiça climática, é uma luta que envolve a participação de diversos setores da sociedade, como mulheres, população negra, povos indígenas e comunidades tradicionais.

Considerações Finais

A fundamentação deste estudo baseou-se em uma análise sistemática e integrativa, que permitiu a síntese de diversos métodos e perspectivas sobre o tema. Complementarmente, foi aplicada uma análise bibliométrica, viabilizando o mapeamento quantitativo da produção científica, a identificação de tendências de publicação e o reconhecimento dos principais autores e periódicos da área.

Nas simulações iniciais de busca com base na Figura 2, a combinação direta dos quatro termos resultou em um único documento. Desta forma, em uma segunda fase o cruzamento final entre os termos, passou por pequenos ajustes metodológicos para garantir maior amplitude e consistência na amostra com dois blocos de buscas: ("climate justice" AND "human rights" = 247 documnetos) e depois ("Sustainable Development Goals (SDGs)" AND "planetary boundaries" = 290 documentos).

A ligação entre direitos humanos, justiça energética e climática e os compromissos da Agenda 2030 (ODS) e dos limites planetários está no reconhecimento de que as crises ambientais, energéticas e sociais são interdependentes e afetam de forma desproporcional as populações mais vulneráveis. Garantir a transição para um futuro sustentável exige equidade e a proteção dos direitos das pessoas, mantendo a estabilidade dos sistemas que sustentam a vida na Terra em consonância com o conceito de limites planetários.

A economia que emite carbono e outros gases de efeito estufa, tanto ao produzir quanto ao consumir os artefatos da indústria, da agricultura e da pecuária, polui a atmosfera, contamina os solos, desmata as florestas, acidifica e aquece os oceanos. Adicionalmente, de forma indireta leva à extrapolação dos limites planetários, sem que a maioria da sociedade entenda, pois é uma realidade muito ampla, altera o regime das chuvas, provoca secas e alagamentos, furacões e tufões, interfere no fluxo das correntes marítimas, causa degelo em calotas polares, aumenta as áreas desertificadas, propicia a ocorrência de incêndios e ondas de calor que causam mortes de pessoas, animais e plantas (OC, 2025).

Essa é a dimensão ecológica do debate entre direitos humanos, justiça energética e justiça climática. Reconhecer, portanto, essa interdependência é fundamental para que políticas públicas e ações globais sejam pautadas pela equidade, pela preservação planetária e pela centralidade dos direitos humanos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte da infraestrutura e equipamentos do NIPE/UNICAMP e a equipe de pesquisadores dos eixos 4 e 6 do CP2B/UNICAMP, Processo FAPESP 2024/01112-1 - PCD - CCD - Centros de Ciências para o Desenvolvimento.

Referências Bibliográficas

BLOG KLABIN, Disponível: https://blog.klabin.com.br/-/energia-limpa-renovavel, Acessado: Setembro 2025.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S). Global Climate Highlights 2024: 2024 is the warmest year on record, with global temperatures exceeding 1.5°C above pre-industrial levels. [S. l.]: Copernicus, 2025. Disponível em: https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024, Acessado em: 25 mar. 2026.

DE ASSIS, N. S., et al., TRANSIÇÃO ENERGÉTICA, JUSTIÇA CLIMÁTICA E DIREITO À EXISTÊNCIA: CAMINHOS DA TRANSIÇÃO PARA SOCIEDADE HIPOCARBÔNICA E FUNÇÃO JURISDICIONAL NO IMBRÓGLIO DO CLIMA. ARACÊ, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 7020–7047, 2024. DOI: 10.56238/arev6n3-161. Disponível: https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/1356.

G1, https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2025/09/24/limites-planetarios-novo-relatorio-oceanos-entram-na-zona-de-perigo.ghtml?utm_source=share-universal&utm_medium=share-bar-app&utm_campaign=materias, Acessado: Setembro 2025.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Desigualdades no Saneamento Básico no Brasil: Uma análise sobre renda, gênero e raça. São Paulo: Trata Brasil, 2024. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/estudos/desigualdades-no-saneamento-basico-no-brasil/, Acessado em: 25 mar. 2026.

MENSAH P. e YANKSON E., Biomass energy as a catalyst for achieving global sustainability goals: technological advancements and policy implications, Academia Green Energy 2025; https://doi.org/10.20935/AcadEnergy7556.

MIT CLIMATE Portal, What We Know About Climate Change, Disponível: https://climate.mit.edu/, Acessado: Setembro, 2025.

OC, Observatório do Clima, Quem precisa de justiça climática no Brasil, Disponível: https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2022/08/Quem_precisa_de_justica_climatica-DIGITAL.pdf, Acessado: Setembro 2025.

PIK, Planetary Health Check 2025: A Scientific Assessment of the State of the Planet, Disponível: https://www.pik-potsdam.de/en, Acessado: Setembro 2025.

ROCKSTRÖM, Johan et al. A safe operating space for humanity. Nature, v. 461, n. 7263, p. 472-475, 2009. DOI: https://doi.org/10.1038/461472a.

SGDES, Superintendência Geral de Desenvolvimento Econômico e Social, Núcleo de Projetos Estratégicos (NPE), https://www.sgdes.pr.gov.br/Endereco/Superintendencia-Geral-de-Desenvolvimento-Economico-e-Social-SGDES, INFORME ODS, 5, 2025.

STEFFEN, Will et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science, v. 347, n. 6223, p. 1259855, 2015. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1259855.

WRI, World Resources Institute, Entendendo Justiça Climática, Disponível: https://www.wribrasil.org.br/noticias/entenda-o-que-e-justica-climatica, Acessado: Setembro 2025.

Wuebben et al., Planning for energy justice? A discourse analysis of energy planning and climate policy in South America, Applied Energy journal, homepage: www.elsevier.com/locate/apenergy, 126041, Volume 393, September, 2025, 10p.

DRENAGEM URBANA, JUSTIÇA CLIMÁTICA E DESAFIOS DO BEM VIVER: UMA ANÁLISE SOCIOAMBIENTAL INTEGRADA NO CANAL SÃO JOAQUIM (BELÉM-PA)

1 Lucio Silva do Nascimento, 2 Isabelle Santos Benito, 3 Dra.Rita Denize de Oliveira
1 Universidade Federal do Pará, e-mail:lucionascimento2108@gmail.com; 2 Universidade Federal do Pará, e-mail; isabelle.benito@ifch.ufpa.br; 3 Universidade Federal do Pará, e-mail: ritadenize@ufpa.br

Palavras-chave: Drenagem urbana; Justiça ambiental; Periferia.

Resumo

A Bacia Hidrográfica do Una, em Belém (PA), é marcada por intensos processos de urbanização, impermeabilização do solo e recorrentes inundações, especialmente nos períodos chuvosos. Este estudo analisa o Canal São Joaquim e seu entorno, abrangendo áreas dos bairros da Sacramenta e Barreiro, onde intervenções recentes de infraestrutura, vinculadas à preparação da cidade para a COP-30, têm produzido impactos socioambientais significativos. O objetivo é compreender a relação entre a dinâmica geomorfológica da bacia, as intervenções urbanas e as condições de vida das populações periféricas, articulando dimensões físicas e sociais da vulnerabilidade. A metodologia baseou-se em revisão bibliográfica e documental, análise de dados cartográficos e hidrogeológicos do Serviço Geológico do Brasil, elaboração de mapas temáticos, além de observações de campo, registros fotográficos e entrevistas semiestruturadas realizadas entre 2025 e 2026. Também foram analisados documentos comunitários, como dossiês do Movimento Resistência dos Igarapés. Os resultados indicam que áreas de menor altitude concentram maior risco hidrogeológico, com recorrência de alagamentos, agravados pela poluição hídrica e ausência de saneamento. Evidencia-se, ainda, um quadro de precariedade urbana, abandono institucional e injustiça ambiental. Conclui-se que a ausência de gestão integrada e de participação social limita a eficácia das intervenções, reforçando a necessidade de políticas territoriais voltadas ao saneamento, ao direito à cidade e à justiça climática na Amazônia urbana mesmo após as obras da Conferência das Partes (COP-30).

Introdução

O processo de urbanização nas cidades amazônicas, em especial na Região Metropolitana de Belém (PA), caracteriza-se por intensas desigualdades socioespaciais, marcadas pela ocupação desordenada, carência de infraestrutura básica e omissão do poder público em áreas periféricas. Essas condições acentuam vulnerabilidades e comprometem a qualidade de vida de populações historicamente marginalizadas.

Um caso emblemático dessa dinâmica é a bacia hidrográfica do Una, onde está o Canal São Joaquim, localizado na região sul de Belém (PA), que simboliza um território marcado por intensos processos de urbanização e pela ocorrência de problemas ambientais associados ao crescimento desordenado da cidade. Os rios que compõem essa bacia, como o Canal São Joaquim, cumpre papel essencial na drenagem natural e na regulação hídrica urbana, porém vêm sofrendo constantes transformações recentes devido às intervenções públicas e privadas.

A impermeabilização do solo, a supressão da cobertura vegetal e a ocupação irregular das margens potencializam os alagamentos, o assoreamento e a poluição das águas, comprometendo o bem viver das populações residentes próximas ao Canal e também a dinâmica geomorfológica local.

Entre as intervenções recentes na cidade de Belém, que se prepara para a COP-30, destaca-se a construção do parque Linear São Joaquim e as transformações recentes na rua da marinha, ambas inseridas no entorno do canal São Joaquim.

Apesar de apontadas como intervenções voltadas à melhoria da mobilidade e da drenagem, essas obras têm potencial para gerar conflitos socioambientais, evidenciando relatos comunitários de moradores que denunciam alagamentos persistentes, insegurança e ausência de diálogo com o poder público, no Canal São Joaquim verifica-se a ausência do saneamento básico, o acúmulo de resíduos sólidos e químicos, representando um verdadeiro lixão a céu aberto, inserido numa área onde abriga populações carentes e periféricas, compondo um quadro recorrente e evidente no que tange à injustiça ambiental.

Este estudo contribui para o debate sobre justiça climática na Amazônia urbana ao articular análise geomorfológica, leitura territorial e experiências cotidianas de moradores periféricos, evidenciando as contradições entre obras de adaptação climática e permanência da vulnerabilidade socioambiental.

"Afinal, de que maneira as obras de infraestrutura recentes, realizadas no canal São Joaquim, contribuem para o agravamento dos conflitos socioambientais e historicamente vivenciados pelas comunidades da bacia do Una?"

Referencial Teórico

O processo de urbanização nas cidades brasileiras, especialmente na Amazônia, ocorreu de forma acelerada e marcado por fortes desigualdades socioespaciais. Segundo Monte-Mór (2005) e Corrêa (2011), a expansão urbana periférica se deu, em grande medida, sem infraestrutura adequada, resultando em territórios caracterizados pela precariedade dos serviços urbanos e pela omissão do poder público.

Essa dinâmica reforça a produção de um espaço urbano fragmentado, onde áreas centrais concentram investimentos, enquanto as periferias permanecem à margem das políticas públicas. Nesse contexto, os territórios localizados no entorno de

canais urbanos, como o Canal São Joaquim, tornam-se expressões concretas dessa desigualdade, concentrando problemas estruturais que afetam diretamente a qualidade de vida da população.

A relação entre urbanização e recursos hídricos é central para compreender os problemas enfrentados nas cidades. De acordo com Tucci (2007), o crescimento urbano desordenado impacta diretamente os sistemas de abastecimento, esgotamento sanitário e drenagem pluvial, ampliando riscos como enchentes e alagamentos.

A impermeabilização do solo reduz a infiltração da água e aumenta o escoamento superficial, antecipando e intensificando os picos de cheia. Além disso, soluções tradicionais de engenharia, como canalizações, muitas vezes não resolvem o problema, apenas transferindo os impactos para outras áreas da bacia hidrográfica.

Dessa forma, a drenagem urbana deve ser compreendida como um sistema complexo, que exige planejamento integrado e não apenas intervenções pontuais.

A análise geomorfológica permite compreender como os processos naturais interagem com a urbanização. Tricart (1977) destaca que as bacias hidrográficas funcionam como sistemas interdependentes, nos quais alterações em um ponto afetam toda a dinâmica do território.

No caso da Bacia do Una, essa perspectiva é fundamental. Apesar de apresentar características morfométricas que favorecem o escoamento gradual das águas, como formato alongado e baixa circularidade, a ocupação irregular, o descarte de resíduos e a modificação dos canais comprometem esse equilíbrio natural (Tabela 01).

Assim, os alagamentos recorrentes não podem ser explicados apenas por fatores físicos, mas pela interação entre a dinâmica natural da bacia e os processos de urbanização. De acordo com Alves, Alves e Costa (2019; p. 557) a Bacia do Una é uma área geográfica que abrange 20 bairros da cidade de Belém (PA) dentre esses Pedreira, Marco, Sacramenta e outros. Trata-se de uma extensão territorial que abrange aproximadamente 60% do sítio urbano de Belém, com uma área de 36,64 km² e 397.339 habitantes segundo o IBGE (2010). Até os anos 1990, a Bacia do Una comportava uma grande quantidade de áreas alagáveis, que durante a década de 90 passou um intenso processo de reformulação. O Projeto de Macrodrenagem da Bacia do Una (PMU), porém, gerou muitas insatisfações populares pelas como da Frente Dos Moradores Prejudicados Da Bacia Do Una (FMPBU).

Tabela 01: Características Morfométricas da bacia do Una

Características	**Descrição**	**Unidades**	**Valor**
Físicas	Área de drenagem (A)	km²	44,01
	Perímetro (P)	km	37,91
	Comprimento do eixo da bacia	km	7,84
	Coeficiente de compacidade (Kc)	Adimensional	1,6
	Fator forma (F)	Adimensional	0,44
Geométricas	Índice de circularidade (Ic)	Adimensional	0,39
	Altitude máxima	m	40
	Altitude média	m	22,5
	Altitude mínima	m	5
	Amplitude altimétrica (Hm)	m	35
	Relação de relevo (Rr)	m/km	4,46
Relevo	Índice de sinuosidade (Is)	m/m	1,27
	Comprimento do rio principal	km	9,98
	Comprimento total da rede de drenagem	km	41,65
	Densidade de drenagem (Dd)	km/km²	0,94
Rede de drenagem	Ordem da bacia	-	3

Fonte: Adaptado de Lira et al. (2015).

A noção de justiça ambiental é essencial para interpretar a distribuição desigual dos impactos ambientais nas cidades. Acselrad (2010) afirma que a injustiça ambiental ocorre quando populações socialmente vulneráveis são expostas de forma desproporcional a riscos ambientais, enquanto permanecem excluídas dos benefícios das políticas públicas.

No contexto da Bacia do Una e do Canal São Joaquim, essa realidade se manifesta na concentração de problemas como poluição hídrica, ausência de saneamento e recorrência de alagamentos em áreas periféricas.

Esses territórios evidenciam que os impactos ambientais não são distribuídos de forma homogênea, mas seguem padrões sociais, econômicos e históricos que reforçam desigualdades.

A perspectiva da justiça climática amplia esse debate ao considerar que os efeitos das mudanças ambientais e das intervenções urbanas atingem de maneira desigual diferentes grupos sociais. Segundo Moreno (2021), populações periféricas e historicamente marginalizadas são as mais afetadas por esses processos.

Nesse cenário, emergem práticas de resistência e organização comunitária. Como aponta Berth (2018), grupos marginalizados constroem estratégias de enfrentamento e reivindicação de direitos, transformando o espaço urbano em um campo de disputa por dignidade e visibilidade.

Material e Métodos

Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Una é a maior em extensão dentro da capital, abrangendo 20 bairros residenciais, sendo quatro parcialmente (Marco, Nazaré, São Brás e Val-De-Cans), e 16 integralmente (como Barreiro, Sacramenta, Fátima, Telégrafo, Pedreira, Maracangalha, Mangueirão e Marambaia), está situada entre as coordenadas geográficas 01°22’40’’S e 01°27’21,04’’S; e 48°26’11,53”W e 48º28’27,56”W. O principal canal tributário analisado foi o Canal São Joaquim, que apresenta histórico de urbanização desordenada e impactos ambientais significativos (Figura 01).

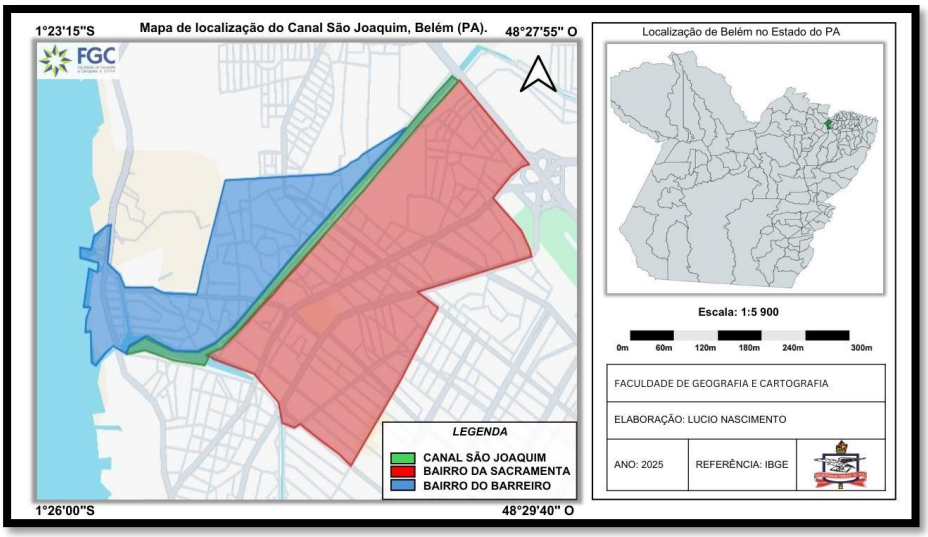


Figura 01: Recorte da Área do Canal São Joaquim, entre os bairros do Barreiro e da Sacramenta.
Fonte: Autoral (2025)

Procedimentos metodológicos

A pesquisa foi desenvolvida a partir da articulação entre diferentes técnicas de coleta e análise de dados, integrando abordagens bibliográficas, documentais, cartográficas e empíricas.

Inicialmente, realizou-se um levantamento bibliográfico, com base em artigos científicos, livros e trabalhos acadêmicos que abordam urbanização, drenagem urbana, geomorfologia e justiça ambiental, permitindo a construção do referencial teórico e a contextualização do problema de pesquisa. Paralelamente, foi conduzida uma análise documental, incluindo dados institucionais, relatórios técnicos e documentos produzidos por movimentos sociais, como dossiês e registros comunitários relacionados à Bacia do Una, contribuindo para a compreensão dos conflitos socioambientais e das reivindicações locais. No âmbito da análise espacial, foram utilizados dados cartográficos e geotecnologias, incluindo Modelos Digitais de Elevação (SRTM), imagens de satélite Sentinel-2 e bases vetoriais obtidas por meio de plataformas como OpenStreetMap e Google Earth. Esses dados foram processados em ambiente SIG (QGIS), permitindo a produção e interpretação de mapas relacionados à morfometria da bacia, áreas de risco e dinâmica do escoamento superficial.

Trabalho de campo e coleta empírica

O trabalho de campo foi realizado a partir de junho de 2025 e com análises recentes em fevereiro e março de 2026, nos bairros da Sacramenta e do Barreiro, áreas diretamente influenciadas pelo Canal São Joaquim. Durante essa etapa, foram realizadas observações sistemáticas, registros fotográficos e análise das condições ambientais e urbanas, com foco em aspectos como saneamento, presença de resíduos sólidos, ocorrência de alagamentos e infraestrutura local.

Além disso, foram realizadas 10 entrevistas semiestruturadas entre junho de 2025 e março de 2026, com moradores residentes há mais de cinco anos no entorno do canal, além de dois trabalhadores do comércio local e um representante de movimento social, selecionados com base em sua relação cotidiana com o território. Os relatos foram registrados mediante consentimento, gravados e posteriormente transcritos, permitindo a análise qualitativa das percepções sobre vulnerabilidade, segurança, condições ambientais e atuação do poder público. Também foram consideradas entrevistas com representantes de movimentos sociais locais, contribuindo para a compreensão das formas de organização comunitária e das demandas por justiça ambiental

Análise dos dados

A análise dos dados foi realizada de forma integrada, combinando informações de diferentes naturezas. Os dados cartográficos e ambientais foram utilizados para identificar áreas de maior vulnerabilidade, considerando fatores como altitude, densidade populacional e suscetibilidade a alagamentos. Já os dados qualitativos, provenientes das entrevistas e observações de campo, foram analisados por meio de análise de conteúdo, permitindo identificar padrões, percepções e experiências vividas pelos moradores. A articulação entre essas diferentes fontes possibilitou uma leitura abrangente do território, relacionando os aspectos físicos da bacia hidrográfica com as dinâmicas sociais e políticas que configuram a vulnerabilidade socioambiental no entorno do Canal São Joaquim.

Resultados e Discussão

A análise integrada entre dados técnicos, observações de campo e entrevistas evidencia que a realidade socioambiental no entorno do Canal São Joaquim é marcada por uma contradição central: enquanto o território é alvo de intervenções urbanas recentes, associadas à preparação de Belém para a COP-30, persistem — e, em alguns casos, se intensificam — condições estruturais de vulnerabilidade. Do ponto de vista físico, os dados altimétricos e morfométricos confirmam que as áreas situadas em cotas mais baixas da Bacia do Una concentram maior suscetibilidade a alagamentos. No entanto, o trabalho de campo demonstra que essa condição natural é amplificada por processos antrópicos, especialmente pela impermeabilização do solo, ocupação de áreas de várzea e obstrução dos canais por resíduos sólidos. Assim, os alagamentos recorrentes não podem ser compreendidos como eventos naturais isolados, mas como expressão de uma urbanização que desconsidera a dinâmica da bacia hidrográfica, conforme já apontado por Tucci (Tabela 02).

Tabela 02: Classificação das Áreas de Risco dentro dos Limites da Bacia Hidrográfica do Una em 2021

Setor	Bairros afetados	Tipologia	Grau de Risco
1	Benguí, Parque Verde e Mangueirão, Av. Mangueirão e R. São Bento	Inundação	Muito Alto
2	Marco – Canal da Visconde de Inhaúma	Inundação	Muito Alto
3	Pedreira, Umarizal e Fátima – Canais do Galo, 3 de Maio e da Antônio Baena	Inundação	Muito Alto
4	Pedreira e Telégrafo – Canal do Galo, Travessas Timbó e Estrela	Inundação	Muito Alto
5	Pedreira – Canal da Pirajá, Rua Nova e Av. Pedro Miranda	Inundação	Muito Alto
6	Sacramenta – Canal São Joaquim e Malvinas, R. Cláudio Bordalo e Ozimar Silva.	Inundação	Muito Alto
7	Sacramenta – Canal São Joaquim, Pass. Santo Antônio e Bandeirante	Inundação	Muito Alto
8	Barreiro – Canal São Joaquim, Travessa Alferes Costa	Inundação	Alto
9	Sacramenta – Canal São Joaquim, Comunidade Nova Aliança	Inundação	Muito Alto
10	Maracangalha e Barreiro Conj. CDP 2, Ruas Sol nasce para todos e São Sebastião	Inundação	Muito Alto
11	Telégrafo – Comunidade Beira-Mar, Pass. São Pedro.	Inundação	Muito Alto
12	Telégrafo – Comunidade Vila da Barca, Pass. Cametá	Inundação	Muito Alto
13	Telégrafo – Comunidade Vila da Barca, Pass. Praiana	Inundação	Muito Alto
14	Umarizal – Comunidade Vila São Pedro	Inundação	Muito Alto

Fonte: Autor, adaptado do Relatório de Setorização de Áreas de Risco Geológico do SGB.

Entretanto, limitar a análise a fatores técnicos seria insuficiente. As entrevistas realizadas revelam que os impactos da drenagem ineficiente são vividos cotidianamente de forma desigual e profundamente marcada por questões sociais. A fala da moradora Rosa Maria explicita a recorrência dos alagamentos e suas consequências materiais e simbólicas:

"Aqui a gente já se acostumou com a lama e com o cheiro ruim do esgoto. Mas o pior é quando a água sobe e invade tudo. Já perdi sofá, geladeira..." (informação verbal, 2025).

O relato evidencia não apenas a frequência dos eventos, mas a naturalização da precariedade, indicando um processo de adaptação forçada a condições insalubres. Essa naturalização, longe de representar resiliência no sentido positivo, revela a internalização de um quadro de abandono estrutural, no qual perdas materiais e riscos à saúde tornam-se parte do cotidiano.

Além disso, a dimensão da insegurança urbana aparece como elemento indissociável da vulnerabilidade ambiental. A ausência de iluminação pública, a precariedade das passarelas e a falta de policiamento transformam o território em um espaço de risco ampliado, especialmente no período noturno. Como relatado pelos moradores:

"Eu tenho medo de atravessar as pontes à noite. É perigoso..."

"A gente trabalha com medo… aqui não tem iluminação, não tem polícia" (informações verbais, 2025).

Esses elementos indicam que a vulnerabilidade no entorno do canal não se restringe à dimensão hídrica, mas se configura como uma vulnerabilidade multidimensional, articulando precariedade ambiental, insegurança urbana e exclusão institucional.

No que se refere ao saneamento, as evidências empíricas são contundentes. A presença de esgoto a céu aberto, o acúmulo de resíduos sólidos e a ausência de manutenção regular do canal comprometem diretamente a qualidade ambiental e a saúde da população. A fala do feirante João Soares sintetiza essa realidade:

"Esse canal fede. Não tem limpeza, não tem manutenção… é humilhante!" (informação verbal, 2025).

O uso do termo "humilhante" é particularmente significativo, pois desloca a análise para além da infraestrutura, evidenciando a dimensão moral e política da injustiça ambiental. Não se trata apenas de ausência de serviços, mas de uma negação concreta do direito à dignidade. Nesse contexto, as intervenções recentes no território, como o Parque Linear São Joaquim e as obras associadas à COP-30, revelam uma contradição fundamental. Embora justificadas sob o discurso da modernização urbana, melhoria da mobilidade e adaptação climática, tais ações não têm sido percebidas pelos moradores como soluções efetivas para os problemas estruturais enfrentados. Pelo contrário, emergem relatos que indicam a persistência — ou mesmo redistribuição — dos alagamentos após as intervenções (Figura 02).



Figura 02: Algumas áreas que sofreram intervenções recentes no canal São Joaquim
Fonte: Autoral (2025)

Essa situação reforça a crítica de que projetos urbanos orientados por lógicas tecnocráticas tendem a priorizar a visibilidade e a funcionalidade de determinadas áreas, em detrimento das demandas reais das populações locais. Assim, observa-se um descompasso entre o planejamento institucional e a experiência vivida no território, evidenciando a ausência de participação social efetiva nos processos decisórios.

A partir da perspectiva da justiça ambiental, os resultados indicam que os impactos negativos da urbanização e das intervenções recentes recaem de forma desproporcional sobre populações periféricas, majoritariamente negras e de baixa renda (Figura 03). Como argumenta Acselrad, trata-se de um padrão recorrente em que grupos socialmente vulneráveis são mais expostos a riscos ambientais, enquanto permanecem excluídos dos benefícios das políticas públicas.

Entretanto, reduzir esses territórios à condição de passividade seria um equívoco analítico. As evidências de campo demonstram a existência de práticas cotidianas de resistência e solidariedade, como mutirões de limpeza, redes de apoio entre vizinhos e estratégias coletivas de enfrentamento dos alagamentos. Essas ações revelam que, mesmo diante da ausência do Estado, os moradores constroem formas de gestão do território e de cuidado com a vida.

Nesse sentido, o território do Canal São Joaquim deve ser compreendido como um espaço de disputa, no qual coexistem, de um lado, projetos urbanos institucionalizados, frequentemente excludentes, e, de outro, práticas locais que afirmam o direito à cidade e ao bem viver. Essa tensão explicita que a problemática analisada não é apenas técnica ou ambiental, mas profundamente política.

Figura 03: Lixo jogado de forma irregular ao redor do Canal São Joaquim, no bairro da Sacramenta.



Fonte: Autoral (2026)

Por fim, os resultados evidenciam que a persistência dos problemas no Canal São Joaquim está diretamente relacionada a um modelo de urbanização que produz e reproduz desigualdades socioespaciais. As intervenções recentes, ao não incorporarem de forma efetiva os saberes locais e as demandas comunitárias, tendem a reforçar essas desigualdades, ainda que sob o discurso da sustentabilidade e da adaptação climática. De acordo com Trindade Jr. e Oliveira (2024; p.99) a intervenção urbanística no canal São Joaquim é uma obra cuja finalidade primordial está ligada ao embelezamento urbano e paisagístico – com vistas à recepção dos visitantes, à atratividade de capitais e ao atendimento das demandas do evento –, bem como da manutenção dos interesses clientelistas de determinados grupos políticos envolvidos nos preparativos dessa Conferência. Assim, é possível observar uma obra inacabada com diversos impactos naturais e repercussões sociais pela intervenção localizada na parte interna do canal, gerando graves contrastes sociais e agravando inundações urbanas.



Figura 04: Recentes transformações na paisagem do Canal São Joaquim e seu notável desmatamento acelerado pelas obras do parque Linear.

Fonte: Autoral (2026)

Considerações Finais

O presente estudo evidenciou que a realidade socioambiental no entorno do Canal São Joaquim não pode ser compreendida apenas a partir de condicionantes físicos ou de limitações pontuais da drenagem urbana, mas como expressão de um processo histórico de produção desigual do espaço em Belém, especialmente nas áreas periféricas da Bacia do Una.

A análise integrada entre dados morfométricos, observações de campo e relatos dos moradores demonstrou que os alagamentos recorrentes, a precariedade do saneamento e a degradação ambiental são agravados por um modelo de urbanização que negligencia a dinâmica natural da bacia hidrográfica e marginaliza populações socialmente vulneráveis. Nesse sentido, os problemas identificados extrapolam a dimensão técnica e revelam uma problemática estrutural, vinculada à desigual distribuição dos investimentos urbanos e à permanência da injustiça ambiental.

As intervenções recentes associadas à preparação de Belém para a COP-30, como as obras no entorno do Canal São Joaquim e a implantação do Parque Linear, embora apresentadas sob o discurso da modernização urbana e da adaptação climática, ainda não têm se traduzido em melhorias efetivas para a população residente nas áreas mais vulneráveis. Ao contrário, os resultados sugerem a persistência de contradições entre o planejamento institucional e as necessidades concretas do território, evidenciando um processo no qual a visibilidade urbana e a valorização paisagística podem se sobrepor ao direito à moradia digna, ao saneamento e à segurança socioambiental.

Dessa forma, conclui-se que a problemática do Canal São Joaquim está diretamente relacionada à reprodução de desigualdades socioespaciais historicamente consolidadas na Amazônia urbana. A permanência de esgoto a céu aberto, descarte irregular de resíduos, insegurança e alagamentos recorrentes demonstra que a infraestrutura implementada, quando desarticulada das demandas comunitárias, tende a atuar de forma limitada e, em certos casos, a reforçar processos de exclusão territorial.

Entretanto, o trabalho também evidenciou que esses territórios não devem ser reduzidos à condição de vulnerabilidade passiva. As práticas de resistência cotidiana, os mutirões comunitários e as redes locais de solidariedade revelam formas concretas de produção do espaço e de defesa do direito à cidade, constituindo importantes expressões de luta por justiça climática e bem viver.

Por fim, defende-se a necessidade de políticas públicas territorialmente integradas, que articulem drenagem urbana, saneamento básico, participação social e justiça ambiental, incorporando os saberes e as experiências dos sujeitos que vivenciam cotidianamente os impactos das intervenções urbanas. Sem essa integração, os projetos de adaptação climática e requalificação urbana tendem a reproduzir as mesmas desigualdades que historicamente estruturam a periferia belenense.

Referências

ACSELRAD, Henri. Ambientalização das lutas sociais: o caso do movimento por justiça ambiental. *Estudos Avançados*, v. 24, n. 68, p. 103–119, 2010.

ALVES, André Luiz Santos; ALVES, Edivania Santos; COSTA, José de Jesus. Frente dos Moradores Prejudicados da Bacia do Una (FMPBU) em Belém/Pará: lutas pelo direito à cidade. In: CONGRESO DE LA ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE SOCIOLOGÍA, 32., 2019, Lima. Anais [...]. Lima: ALAS, 2019. Disponível em: https://cdsa.aacademica.org/000-030/2051.pdf. Acesso em: 30 mar. 2026.

BERTH, Joice. *O que é empoderamento?* São Paulo: Letramento, 2018.

CORRÊA, Roberto Lobato. *O espaço urbano*. 6. ed. São Paulo: Ática, 2011.

LIRA, E. M. et al. Caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Una, Belém (PA). Belém: [s.n.], 2015.

MONTE-MÓR, Roberto Luís de Melo. A periferia como lugar. In: MARICATO, Ermínia (org.). *As cidades do povo: alternativas para as cidades brasileiras*. Petrópolis: Vozes, 2005.

MORENO, Camila. *A política da justiça climática: da economia verde à luta por direitos*. São Paulo: Autonomia Literária, 2021.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). *Relatório de setorização de áreas de risco em Belém*. Brasília: SGB, 2021.

TRICART, Jean. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977.

TRINDADE JÚNIOR, Saint-Clair Cordeiro; OLIVEIRA, Helbert Michel Pampolha. Grandes objetos versus objetos de grandeza cidadã: dilemas e desafios da preparação da COP 30 em Belém–Pará. In: FOLHES, Ricardo Theophilo; GONÇALVES, Marcela Vecchione (org.). *Para além da COP 30: tópicos sobre desenvolvimento na Amazônia em tempos de emergência climática*. Belém: NAEA, 2024. p. 91–127.

TUCCI, Carlos E. M. *Inundações urbanas*. Porto Alegre: RHAMA, 2007.

O CALOR COMO CATALISADOR DA DESIGUALDADE EDUCACIONAL NO SUL GLOBAL

1 Milena Falchetti Santos, 2 Amanda Evellyn de Oliveira Pacheco, 3 Julia Costadelle Patrício, 4 Carlos André Bassi Zacarkim, 5 Emelly Teles Felix da Silva

1 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: milena.sanchetti@gmail.com; 2 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: amandapchco@gmail.com; 3 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: costadelle.j@gmail.com 4 Universidade Federal de Mato Grosso, é czacarkim7@gmail.com; 5 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: emellytelesfelix@gmail.com

Palavras-chave: educação; desigualdade social; justiça climática.

Resumo

O aumento das temperaturas globais decorrente das mudanças climáticas tem produzido impactos significativos em diferentes dimensões sociais, incluindo a educação. Este artigo tem como objetivo analisar, por meio de uma revisão crítica da literatura, os efeitos do calor - especialmente o estresse térmico e o conforto térmico inadequado - sobre o desempenho acadêmico de estudantes, com ênfase nas desigualdades socioeconômicas em países do Sul Global. Estudos demonstram que temperaturas elevadas prejudicam funções cognitivas essenciais, como atenção, memória e processamento de informações, resultando em queda no desempenho escolar (GOODMAN et al., 2020; GRAFF ZIVIN; SHRADER, 2016). Além disso, a exposição ao calor é desigual, sendo mais intensa em contextos de vulnerabilidade social, onde há menor acesso a infraestrutura adequada, como climatização e áreas verdes (HSIANG et al., 2013; GOODMAN et al., 2020). A literatura converge ao indicar que o calor atua não apenas como um fator ambiental, mas como um mecanismo que amplifica desigualdades educacionais preexistentes. Conclui-se que a questão térmica deve ser incorporada às agendas de políticas educacionais e climáticas, sobretudo em países em desenvolvimento, onde os impactos tendem a ser mais severos e desiguais.

Introdução

As mudanças climáticas configuram-se como um dos desafios mais urgentes da contemporaneidade, com projeções que indicam um aumento da temperatura média global de até 1,5°C nas próximas duas décadas (AMEER; GHANNAM, 2025). Nos países de baixa e média renda, essa problemática é intensificada por limitações estruturais, como infraestrutura precária, escassez de recursos e forte dependência de setores econômicos sensíveis às variações climáticas (AMEER; GHANNAM, 2025; FARRÉ COMA, 2025). Nesse contexto, emerge uma dimensão frequentemente negligenciada no debate sobre os impactos climáticos: a influência do calor extremo sobre o processo de aprendizagem e o desenvolvimento do capital humano.

O ambiente escolar, tradicionalmente concebido como um espaço de promoção da equidade, passa a reproduzir desigualdades sociais quando submetido a condições térmicas inadequadas. Estudantes em contextos de maior vulnerabilidade frequentemente enfrentam salas de aula com temperaturas elevadas, sem ventilação adequada ou sistemas de climatização, em contraste com a realidade de grupos socioeconomicamente favorecidos (ERSAN; RODRIGUEZ, 2020). Tal cenário evidencia que o problema ultrapassa a dimensão física da temperatura, estando profundamente enraizado em desigualdades estruturais, como a ausência de eletrificação e a precariedade das condições habitacionais, que ampliam a suscetibilidade ao estresse térmico (SOVACOOL; RYAN, 2016; KATOCH et al., 2024).

Diante disso, o presente artigo tem como objetivo analisar de que forma o calor impacta a cognição e o desempenho acadêmico, atuando como um mecanismo de estratificação social. A partir da análise de evidências empíricas no contexto do Sul Global, busca-se demonstrar que a garantia do direito à educação de qualidade está intrinsecamente associada à oferta de ambientes termicamente adequados, evidenciando a necessidade de integrar a dimensão climática às políticas educacionais (FURLAN; LEAL FILHO, 2025).

Material e Métodos

A presente pesquisa configura-se como uma revisão de literatura de natureza qualitativa, com caráter descritivo e exploratório, cujo objetivo é analisar as relações entre estresse térmico, conforto ambiental, desempenho cognitivo e desigualdades socioambientais no contexto educacional. O estudo foi estruturado a partir da análise de produções científicas internacionais, com ênfase em investigações conduzidas em países do Sul Global ou em realidades socioeconômicas semelhantes.

A coleta de dados foi realizada por meio da base de dados Web of Science (WoS), reconhecida por sua abrangência na catalogação de periódicos científicos. A estratégia de busca foi estruturada a partir de operadores booleanos, combinando termos relacionados à localização geográfica (Brazil OR "Global South" OR "Latin America" OR "developing countries"), às condições térmicas e climáticas (temperature OR heat OR "heat stress" OR "thermal comfort" OR "urban heat island" OR climate), ao contexto educacional (students OR education OR schools OR learning OR "academic performance") e às dimensões de desigualdade (inequality OR "socioeconomic status" OR poverty OR "social vulnerability"). A aplicação dessa estratégia resultou na identificação inicial de 362 artigos, publicados entre os anos de 2000 a 2026.

A etapa de seleção dos estudos foi conduzida considerando como critério de inclusão a aderência temática aos três eixos centrais da pesquisa: (i) efeitos do calor na cognição e no desempenho acadêmico, (ii) conforto térmico em ambientes escolares

e (iii) desigualdade educacional associada a fatores climáticos e socioeconômicos. Foram excluídos os estudos que, embora relacionados aos descritores utilizados, não apresentavam conexão direta com o ambiente educacional ou não abordavam explicitamente a interação entre variáveis climáticas e aspectos sociais. Após a triagem, foram selecionados 22 artigos considerados mais relevantes para compor a base do estudo.

Adicionalmente, foram incorporados estudos complementares identificados por meio de busca manual e análise das referências dos trabalhos selecionados, com o objetivo de aprofundar discussões específicas e ampliar a contextualização teórica do tema. Esses estudos contribuíram para o fortalecimento da análise, especialmente em aspectos que não foram plenamente contemplados pelos artigos inicialmente selecionados.

Resultados e Discussões

A relação entre extremos climáticos e educação é fortemente mediada pela pobreza multidimensional, que condiciona a capacidade de resposta e adaptação das populações mais vulneráveis (KIMSANOVA et al., 2024). Eventos extremos, como inundações e ondas de calor, provocam danos diretos à infraestrutura escolar, comprometendo a funcionalidade das instituições de ensino e, em muitos casos, tornando o acesso físico à escola inviável (ABDULLAH-AL-BAKI; AHMED, 2025; AMEER; GHANNAM, 2025). Evidências empíricas demonstram que a exposição precoce a desastres pode gerar impactos duradouros na trajetória educacional, como observado em Bangladesh, onde tais eventos estão associados à redução persistente dos níveis de escolaridade concluída (ABDULLAH-AL-BAKI; AHMED, 2025).

Além dos efeitos diretos, os impactos climáticos também se manifestam de forma indireta por meio de alterações na dinâmica econômica das famílias. A ocorrência de quebras de safra, frequentemente associadas a eventos climáticos extremos, reduz a renda domiciliar e pode levar à intensificação do trabalho infantil, uma vez que estudantes são compelidos a contribuir para a subsistência familiar (KIMSANOVA et al., 2024; AMEER; GHANNAM, 2025). A literatura também evidencia que os impactos das mudanças climáticas não se restringem ao curto prazo, produzindo efeitos persistentes ao longo do ciclo de vida dos indivíduos. Em particular, a exposição a choques climáticos durante a primeira infância – fase crítica do desenvolvimento humano, especialmente entre 0 e 3 anos de idade – está associada a prejuízos duradouros na estatura e no desenvolvimento cognitivo. Esses efeitos se traduzem, em termos educacionais, na redução média de aproximadamente um ano na escolaridade total alcançada, indicando que as adversidades ambientais precoces podem comprometer de forma significativa o capital humano ao longo da vida (ABDULLAH-AL-BAKI; AHMED, 2025; SHAH; STEINBERG, 2017).

Adicionalmente, o aumento das temperaturas e a maior frequência de eventos extremos contribuem para a elevação da incidência de doenças infecciosas, especialmente em contextos com infraestrutura sanitária limitada. Esse quadro impacta diretamente a frequência escolar, uma vez que o agravamento das condições de saúde dos estudantes resulta em maiores taxas de absenteísmo e menor engajamento nas atividades acadêmicas. Consequentemente, observa-se uma deterioração não apenas do desempenho escolar imediato, mas também do bem-estar geral dos alunos, reforçando a natureza multifacetada dos impactos climáticos sobre a educação (KATOCH et al.., 2024).

Paralelamente, o aumento das temperaturas favorece a proliferação de doenças transmitidas por vetores, como a malária, o que resulta em maior incidência de problemas de saúde, elevação das taxas de absenteísmo escolar e comprometimento do desempenho acadêmico (AMEER; GHANNAM, 2025; KATOCH et al., 2024). Dessa forma, os extremos climáticos atuam como fatores que intensificam vulnerabilidades preexistentes, afetando a educação tanto por vias estruturais quanto socioeconômicas e sanitárias.

A exposição ao calor no espaço urbano ocorre de forma desigual, refletindo padrões de segregação socioespacial e distribuição assimétrica de infraestrutura ambiental. O fenômeno das ilhas de calor urbanas intensifica significativamente as temperaturas em áreas densamente povoadas, caracterizadas por elevada impermeabilização do solo e baixa cobertura vegetal, criando condições propícias ao aumento do estresse térmico (HSIANG et al., 2013; ZHANG et al., 2026). Evidências empíricas indicam que bairros com menores indicadores socioeconômicos apresentam, de maneira recorrente, as piores condições de conforto térmico, o que evidencia a relação direta entre vulnerabilidade social e exposição climática (XU et al., 2024).

O conceito de “redlining térmico” contribui para aprofundar a compreensão das desigualdades ambientais no contexto urbano, ao evidenciar como decisões históricas de planejamento e segregação espacial resultaram na distribuição desigual de infraestrutura verde entre diferentes áreas da cidade. Estudos demonstram que comunidades historicamente marginalizadas foram sistematicamente privadas de investimentos em arborização e áreas verdes, o que, no contexto atual, se traduz em temperaturas microclimáticas significativamente mais elevadas – podendo atingir diferenças de até 7°C em comparação a bairros de maior renda dentro de uma mesma cidade (HOFFMAN et al., 2020). Esse padrão reforça a interseção entre desigualdade socioeconômica e exposição aos riscos climáticos, evidenciando que o ambiente construído atua como mediador dos impactos térmicos.

Nesse cenário, estudantes que residem nessas áreas estão sujeitos a um estresse térmico cumulativo, que se manifesta tanto no ambiente domiciliar quanto no escolar. A permanência em residências com baixa ventilação e elevado acúmulo de calor compromete a qualidade do sono, enquanto a exposição a salas de aula superaquecidas durante o período diurno intensifica a fadiga e reduz a capacidade de concentração. Como resultado, há um prejuízo contínuo às funções cognitivas e ao desempenho acadêmico, evidenciando que os efeitos das ilhas de calor urbanas extrapolam o espaço físico e se desdobram em impactos diretos sobre o processo de aprendizagem e o bem-estar dos estudantes.

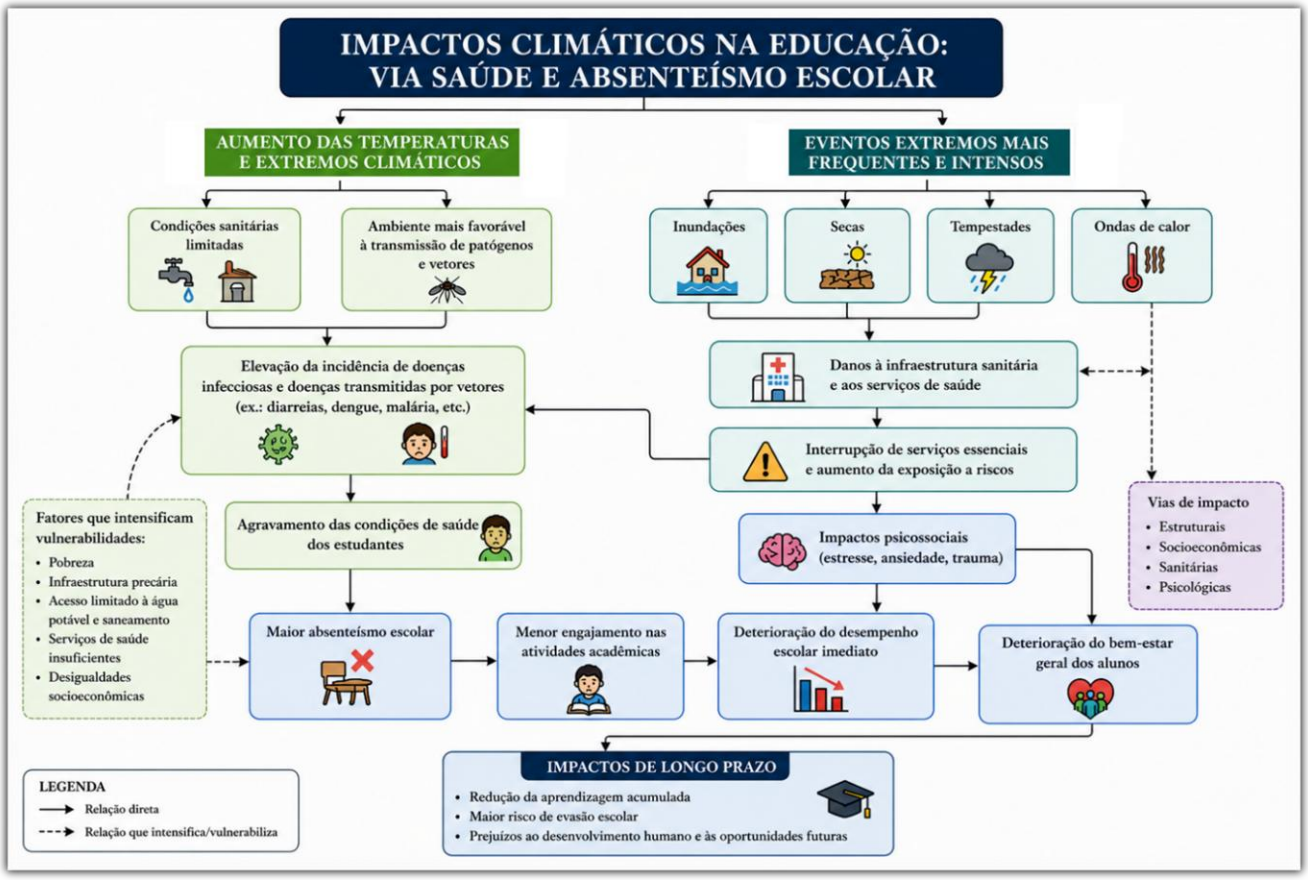


Figura 01: Impactos climáticos na educação: via saúde e absenteísmo escolar.
Fonte: Os autores, (2026).

Nesse contexto, a vegetação urbana desempenha papel fundamental ao oferecer serviços ecossistêmicos de regulação térmica, como sombreamento e evapotranspiração. No entanto, o acesso a esses benefícios é fortemente mediado pela renda, resultando em um déficit crônico de infraestrutura verde em comunidades marginalizadas (ZHANG et al., 2026). Como consequência, essas áreas registram temperaturas locais mais elevadas quando comparadas a regiões mais favorecidas, configurando um processo que pode ser compreendido como "segregação térmica" (ZHANG et al., 2026; XU et al., 2024).

Essa dinâmica implica que estudantes de baixa renda estão expostos a condições térmicas adversas de forma contínua, tanto em seus domicílios quanto nos ambientes escolares, o que gera uma desvantagem cumulativa no processo de aprendizagem. Assim, a distribuição desigual do calor no meio urbano não apenas reflete desigualdades preexistentes, mas também contribui para sua reprodução, ao impactar diretamente o bem-estar e o desempenho educacional desses grupos populacionais.

A infraestrutura escolar configura-se como um determinante crítico da vulnerabilidade frente ao calor, especialmente em contextos do Sul Global, onde a precariedade estrutural compromete diretamente as condições de ensino-aprendizagem. Em diversos países, uma parcela significativa das instituições de ensino ainda carece de acesso à eletricidade – alcançando índices superiores a 80% em determinadas regiões da África Subsaariana – o que evidencia a magnitude do problema (SOVACOOL; RYAN, 2016). A ausência de fornecimento energético não apenas limita o uso de tecnologias da informação e comunicação, mas também inviabiliza a adoção de estratégias básicas de climatização ativa, como ventiladores, intensificando a exposição de estudantes e professores ao estresse térmico (SOVACOOL; RYAN, 2016; KATOCH et al., 2024).

Esse cenário é agravado pela dependência de redes elétricas instáveis, que tendem a colapsar ou operar de forma intermitente justamente em períodos de maior demanda, como durante ondas de calor (AMEER; GHANNAM, 2025). Ademais, muitas escolas localizadas em áreas periféricas são construídas com materiais de baixa qualidade térmica, caracterizados por elevada absorção de calor, o que contribui para a formação de ambientes internos extremamente desconfortáveis, frequentemente descritos como "armadilhas térmicas". Paralelamente, a pobreza energética também se manifesta no ambiente domiciliar, estando associada a piores indicadores educacionais, uma vez que estudantes sem acesso à eletricidade em suas residências enfrentam limitações para a realização de atividades escolares no período noturno, reduzindo seu tempo efetivo de estudo (KATOCH et al., 2024).

Acarretado por esses fatores, o espaço suscetibiliza o estresse térmico ao estudante, que é desencadeado uma série de alterações fisiológicas e psicológicas que comprometem diretamente a capacidade de aprendizagem. Entre as respostas mais recorrentes destacam-se a desidratação, a fadiga intensa, o aumento da frequência cardíaca e a deterioração da qualidade do sono, fatores que, de forma combinada, reduzem o bem-estar e a disposição cognitiva dos indivíduos (DEL CARRETTO et al., 2025). Sob a perspectiva fisiopatológica, a exposição ao calor extremo pode ainda induzir processos de estresse oxidativo e respostas inflamatórias sistêmicas, agravando os impactos sobre a saúde geral e o funcionamento do organismo (DEL CARRETTO et al., 2025).

No contexto escolar, esses efeitos manifestam-se por meio de prejuízos significativos às funções executivas, essenciais para o processo de ensino-aprendizagem. Evidências da literatura indicam reduções na capacidade de atenção, na memória de trabalho e na velocidade de processamento de informações, comprometendo o desempenho acadêmico dos estudantes. Além disso, o aumento da temperatura ambiente tem sido associado a uma queda generalizada nas notas, com impactos mais acentuados em disciplinas que demandam maior raciocínio lógico e resolução de problemas (ERSAN; RODRIGUEZ, 2020). Em síntese, o calor atua como um fator limitante do potencial cognitivo, dificultando a retenção de conteúdos e configurando-se como uma barreira relevante ao engajamento e à eficácia do processo educacional.

Pesquisas empíricas têm demonstrado uma relação consistente entre o aumento da temperatura e a redução do desempenho educacional. Estima-se que, para cada elevação de 1°F (aproximadamente 0,56°C) na temperatura média ao longo de um ano letivo, ocorre uma diminuição de cerca de 1% no aprendizado dos estudantes, evidenciando a sensibilidade do processo educacional às condições térmicas (GOODMAN et al., 2020). Esse efeito não se distribui de maneira homogênea, sendo mais pronunciado entre estudantes pertencentes a minorias étnicas e grupos socialmente vulneráveis, o que reforça o papel das desigualdades estruturais na amplificação dos impactos climáticos sobre a educação.

No contexto do Sul Global, onde as variações térmicas tendem a ser mais intensas e as condições de infraestrutura escolar frequentemente são limitadas, os efeitos do calor tornam-se ainda mais expressivos. Como resultado, tarefas que exigem maior esforço mental, especialmente em áreas como a matemática, passam a representar um ônus cognitivo significativo para os estudantes (ERSAN; RODRIGUEZ, 2020; GOODMAN et al., 2020). Dessa forma, o calor não apenas interfere no conforto térmico, mas também atua como um fator limitante do desempenho acadêmico, aprofundando desigualdades educacionais e dificultando a construção de trajetórias de aprendizagem equitativas.

A análise integrada desses elementos indica que o calor atua como um importante catalisador no ciclo de reprodução da desigualdade. Nesse contexto, a desigualdade estrutural desempenha papel central ao determinar quais grupos populacionais estão mais suscetíveis à exposição térmica, uma vez que condiciona tanto as características das moradias quanto a qualidade da infraestrutura escolar disponível (CURI; GASALLA, 2021). Como consequência, populações socialmente vulneráveis tendem a vivenciar condições mais intensas de calor, situação agravada pela limitada disponibilidade de recursos adaptativos, como sistemas de climatização e acesso à energia (ANDRETTI et al., 2024).

Esse cenário resulta em um estado contínuo de estresse térmico, o qual compromete funções cognitivas essenciais e reduz a eficácia dos processos de ensino-aprendizagem (ERSAN; RODRIGUEZ, 2020). Os impactos são ainda mais pronunciados entre estudantes de menor nível socioeconômico, que, além de enfrentarem condições adversas no ambiente escolar, frequentemente não dispõem de meios para mitigar o desconforto térmico em seus domicílios (ANDRETTI et al., 2024). Evidências da literatura apontam, ainda, que o aumento da temperatura média anual está associado à ampliação das desigualdades regionais de riqueza (KUMAR; MAITI, 2025), enquanto a ausência de energia elétrica em escolas configura um fator limitante significativo ao desenvolvimento educacional (SOVACOOL; RYAN, 2016). Por outro lado, embora o status socioeconômico permaneça como o principal preditor do desempenho acadêmico, o chamado "clima escolar" – que inclui, entre outros aspectos, o conforto térmico – emerge como uma variável passível de intervenção por meio de políticas públicas, representando uma oportunidade concreta para a redução das disparidades no aprendizado (ERSAN; RODRIGUEZ, 2020).

Estudos indicam que a ausência de energia elétrica nas instituições de ensino não apenas inviabiliza estratégias básicas de resfriamento dos ambientes escolares, como ventilação mecânica e climatização, mas também limita significativamente o uso de Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs), fundamentais para práticas pedagógicas contemporâneas. Esse contexto contribui para a configuração de uma condição que pode ser compreendida como uma "pobreza digital-térmica", na qual a privação simultânea de recursos energéticos e tecnológicos intensifica as barreiras ao aprendizado e à inclusão educacional (SOVACOOL; RYAN, 2016). Tal cenário agrava desigualdades já existentes, sobretudo em regiões de menor desenvolvimento, onde a infraestrutura escolar é mais precária e menos resiliente às variações climáticas.

Além disso, evidências da literatura apontam que estudantes residentes em áreas sem acesso adequado à eletricidade frequentemente despendem parte significativa de seu tempo em atividades domésticas essenciais, como a coleta de biomassa para cocção ou de água para consumo. Essas demandas, somadas às longas distâncias percorridas até a escola, muitas vezes sob condições de calor intenso, fazem com que esses alunos iniciem o período letivo já em estado de fadiga física e estresse térmico, fatores que comprometem ainda mais sua capacidade de concentração, engajamento e desempenho acadêmico (ZIVIN; SHRADER, 2016). Nesse sentido, os impactos do calor extrapolam o ambiente escolar, configurando um ciclo de vulnerabilidade que integra condições domiciliares, infraestrutura urbana e desigualdades socioeconômicas, reforçando a necessidade de abordagens intersetoriais para mitigar seus efeitos sobre a educação.

Os resultados obtidos reforçam a necessidade de compreender o calor no ambiente escolar a partir da perspectiva da justiça climática (PITTEL; RUBBELKE, 2013). Nesse contexto, observa-se que populações situadas no Sul Global são desproporcionalmente afetadas pelos impactos educacionais decorrentes do aumento das temperaturas, embora historicamente tenham contribuído em menor escala para o agravamento do aquecimento global (PITTEL; RUBBELKE, 2013; FARRÉ COMA, 2025). Além disso, a natureza difusa e muitas vezes imperceptível do calor enquanto fator de risco contribui para sua "invisibilidade" no debate público, o que pode levar à interpretação equivocada de falhas estruturais – como a precariedade da infraestrutura escolar – como sendo resultado de insuficiência de esforço individual por parte dos estudantes (ANDRETTI et al., 2024).

Diante desse cenário, a adaptação às mudanças climáticas no setor educacional não deve ser compreendida apenas como um conjunto de soluções técnicas pontuais, mas como uma estratégia mais ampla de enfrentamento à produção e à intensificação de riscos socioambientais (FARRÉ COMA, 2025). Isso implica a necessidade de direcionar esforços para as causas estruturais da

vulnerabilidade, incluindo a segregação socioespacial e a pobreza energética, que limitam a capacidade adaptativa de determinadas populações (PAAVOLA, 2015; ESTEVES et al., 2016). Nesse sentido, a educação assume papel central como instrumento de promoção da resiliência, ao possibilitar não apenas a melhoria das condições de aprendizagem, mas também o fortalecimento das capacidades individuais e coletivas para lidar com os desafios impostos pelas mudanças climáticas (KOKKINOPOULOU et al., 2024).

O fluxograma apresentado na Figura 2 sintetiza a relação entre desigualdade social, exposição ao calor e impactos na cognição, evidenciando a natureza cíclica desse processo. Observa-se que fatores estruturais condicionam a exposição térmica, a qual, por sua vez, compromete o desempenho acadêmico e retroalimenta a desigualdade.

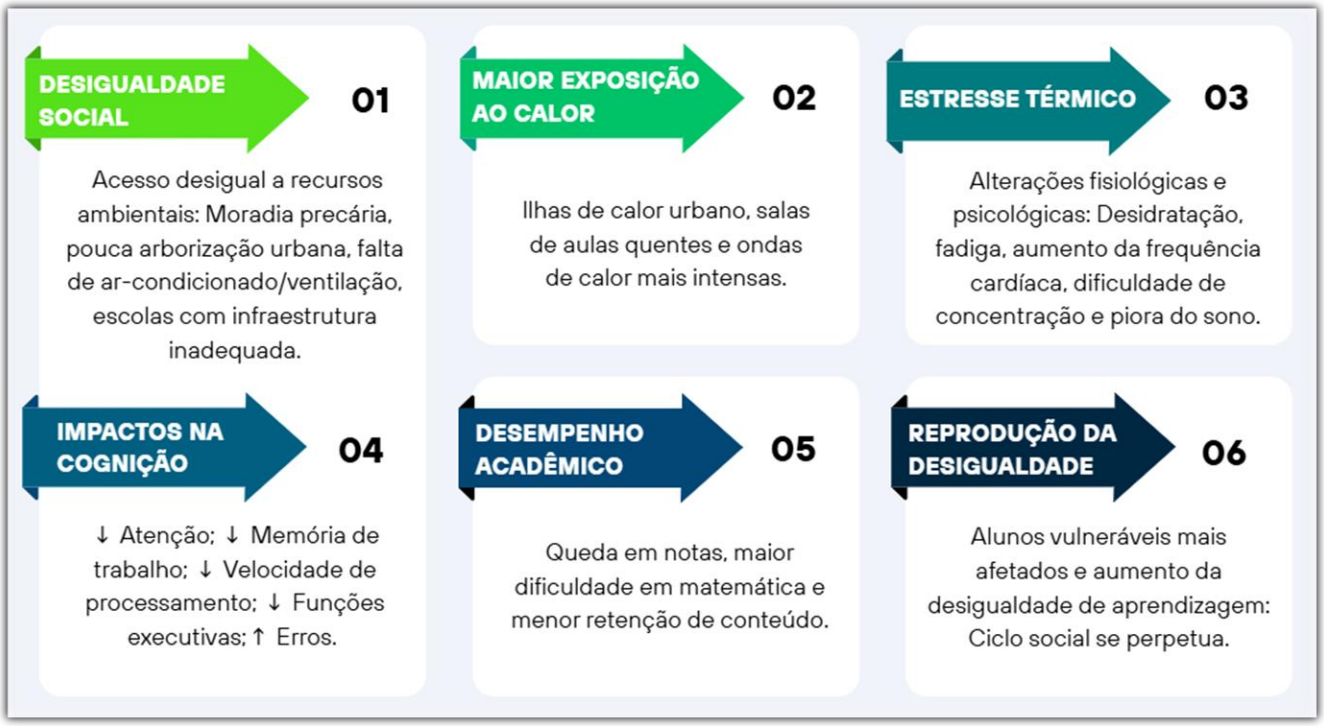


Figura 02: Desigualdade térmica como fator de disparidade educacional.
Fonte: Os autores, (2026).

Comentários finais

O calor extremo configura-se como uma barreira invisível que contribui para o aprofundamento das desigualdades educacionais, na medida em que a precariedade da infraestrutura escolar, o acesso desigual a serviços ambientais e a exposição contínua ao estresse térmico comprometem o desempenho acadêmico e limitam as oportunidades de mobilidade social (ERSAN; RODRIGUEZ, 2020). Nesse cenário, a literatura aponta para a necessidade de formulação e implementação de políticas públicas integradas, capazes de mitigar os impactos das condições climáticas adversas sobre o processo de ensino-aprendizagem.

Entre as principais estratégias destacam-se os investimentos em infraestrutura escolar verde, com ênfase na adoção de soluções passivas de conforto térmico, como ventilação natural, isolamento adequado e criação de áreas arborizadas que contribuam para a formação de microclimas mais amenos, especialmente em regiões periféricas. Paralelamente, a ampliação de programas de eletrificação escolar baseados em fontes renováveis, como energia solar e eólica, mostra-se fundamental para garantir o fornecimento energético estável, viabilizando o uso de sistemas de climatização e tecnologias da informação e comunicação, além de reduzir a dependência de redes elétricas instáveis (SOVACOOL; RYAN, 2016; ZHANG et al., 2026).

Adicionalmente, o planejamento urbano equitativo emerge como um eixo estruturante, ao propor a expansão de infraestrutura verde e de áreas de lazer em bairros de menor nível socioeconômico, contribuindo para a redução das ilhas de calor urbano e para a promoção de justiça ambiental. Soma-se a isso a importância da inclusão da temática das mudanças climáticas e da gestão de riscos nos currículos escolares, de modo a fomentar a conscientização e a capacidade adaptativa desde os níveis iniciais de ensino. Assim, a promoção da justiça climática no campo educacional demanda ações que assegurem que o potencial de aprendizagem não seja condicionado nem pelas variações térmicas nem pela precariedade do ambiente físico, mas sim garantido de forma equitativa a todos os estudantes.

Agradecimentos

Os autores agradecem, primeiramente, à coordenação do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental e a Universidade Federal de Mato Grosso, pelo apoio e incentivo à formação acadêmica. Em especial, reconhecem ao suporte institucional e financeiro pela oportunidade de participação presencial no congresso – experiência que contribuiu para o crescimento profissional dos discentes e para a ampliação da visão sobre a área.

Referências Bibliográficas

ABDULLAH-AL-BAKI, C.; AHMED, A. *The long shadow of natural disasters: educational impacts of the 1991 cyclone in Bangladesh*. World Development, [S.l.], 2025.

AMEER, A.; GHANNAM, R. *Education in a changing climate: a systematic review for low and middle-income countries (LMICs)*. Sustainable Development, [S.l.], 2025.

ANDRETTI, B. et al. *Underestimations of the income-based ecological footprint inequality*. Climatic Change, [S.l.], 2024.
CURI, R. L. C.; GASALLA, M. A. *Social vulnerability and human development of Brazilian coastal populations*. Frontiers in Ecology and Evolution, [S.l.], 2021.

CURI, Rodrigo L. C.; GASALLA, Maria A. Social vulnerability and human development of Brazilian coastal populations. *Frontiers in Ecology and Evolution*, v. 9, 2021.

DEL CARRETTO, M. et al. *Short-term ambient heat exposure and low APGAR score in newborns: a time-stratified case-crossover analysis in São Paulo state, Brazil*. PLOS Global Public Health, [S.l.], 2025.

ERSAN, O.; RODRIGUEZ, M. C. *Socioeconomic status, school climate, and mathematics achievement in developing countries*. Large-scale Assessments in Education, [S.l.], 2020.

ERSAN, Mehmet; RODRIGUEZ, Luis. Temperature and cognitive performance: evidence from classroom settings. *Economics of Education Review*, v. 78, 2020.

ESTEVES, T. et al. *Multi-scale vulnerability assessment for adaptation planning*. Current Science, [S.l.], 2016.

FARRÉ COMA, J. *América Latina en riesgo de desastres: resistencias a la adaptación climática y la resiliencia urbana*. Relaciones Internacionales, [S.l.], 2025.

FURLAN, M.; LEAL FILHO, W. *When access to education matters more than income inequality: a structural equation modelling analysis of climate adaptation and mitigation*. Environmental Development, [S.l.], 2026.

GOODMAN, Joshua; HURWITZ, Michael; PARK, Jisung; SMITH, Jonathan. Heat and learning. *American Economic Journal: Economic Policy*, v. 12, n. 2, p. 306–339, 2020.

GRAFF ZIVIN, Joshua; SHRADER, Jeffrey. Temperature extremes, health, and human capital. *The Future of Children*, v. 26, n. 1, p. 31–50, 2016.

HOFFMAN, Jeremy S.; SHANDAS, Vivek; PENDLETON, Nicholas. The effects of historical housing policies on resident exposure to intra-urban heat: a study of 108 US urban areas. *Climate*, v. 8, n. 1, p. 12, 2020.

HSIANG, Solomon M.; BURKE, Marshall; MIGUEL, Edward. Quantifying the influence of climate on human conflict. *Science*, v. 341, n. 6151, 2013.

KATOCH, O. R. et al. *Impacts of energy poverty on health and education: a systematic review*. International Journal of Energy Sector Management, [S.l.], 2024.

KIMSANOVA, B. et al. *Heterogeneous effects of weather extremes on different dimensions of poverty in Kyrgyzstan*. Environmental Research Letters, [S.l.], 2024.

KOKKINOPOULOU, E. et al. *The impact of education on productivity and externalities of economic development and social welfare: a systematic literature review*. Central European Management Journal, [S.l.], 2024.

KUMAR, N.; MAITI, D. *Distributional impacts of global warming on wealth inequality: evidence from global panel of regions*. Empirical Economics, [S.l.], 2025.

PAAVOLA, J. *Barriers to adaptation to climate change in coastal Tanzania*. Population and Environment, [S.l.], 2015.

PITTEL, K.; RÜBBELKE, D. *International climate finance and its influence on fairness and policy*. The World Economy, [S.l.], 2013.

SHAH, Manisha; STEINBERG, Bryce M. Drought of opportunities: contemporaneous and long-term impacts of rainfall shocks on human capital. *Journal of Political Economy*, v. 125, n. 2, p. 527–561, 2017.

SHAYEGH, S. *Outward migration may alter population dynamics and income inequality*. Nature Climate Change, [S.l.], 2017.

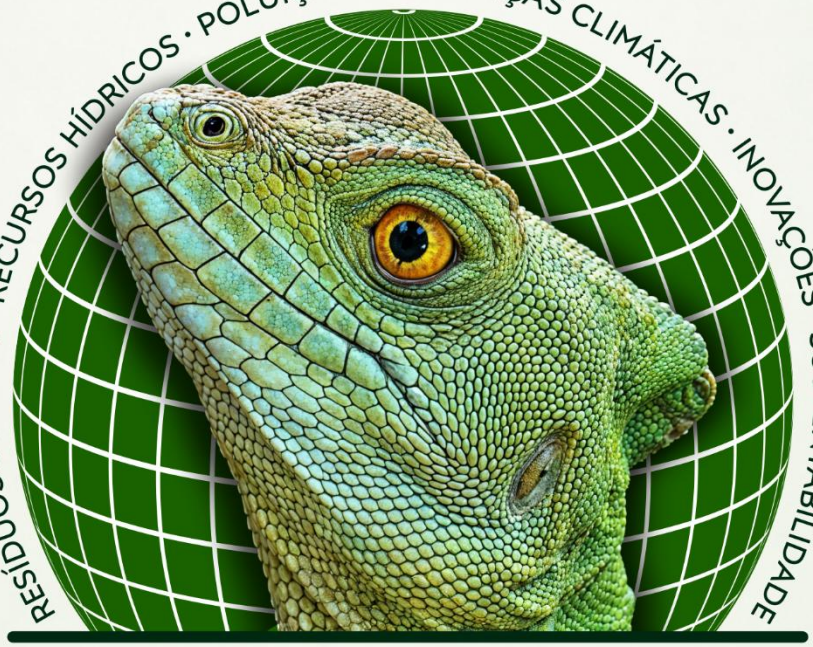
SOVACOOL, B. K.; RYAN, S. E. *The geography of energy and education: leaders, laggards, and lessons for achieving primary and secondary school electrification*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S.l.], 2016.

XU, J. et al. *Identifying vulnerable populations in urban society*. Natural Hazards and Earth System Sciences, [S.l.], 2024.

ZHANG, Y. et al. *Beyond the North-South divide: climatic and socioeconomic interactions shape global patterns of urban greenspace exposure inequality*. Journal of Environmental Management, [S.l.], 2026.

ÁREA TEMÁTICA 17

LOGÍSTICA REVERSA E CADEIAS DE FORNECIMENTO RESPONSÁVEIS



5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE
ENGENHARIA AMBIENTAL

GESTÃO SUSTENTÁVEL DE BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS AO FIM DA VIDA ÚTIL: LOGÍSTICA REVERSA E CADEIAS DE FORNECIMENTO

1 Eduarda Nunes Adolpho, 2 Paula Donaduzzi Rigo, 3 Vanessa Teresinha Alves
1 Universidade Federal de Santa Maria, eduarda.adolpho@acad.ufsm.br; 2 Universidade Federal de Santa Maria, paula.rigo@ufsm.br; 3 Universidade Federal de Santa Maria, vanessa.alves@ufsm.br

Palavras-chave: Gestão sustentável; Baterias de íons de lítio; Logística reversa;

Resumo

A expansão da mobilidade elétrica é apontada como estratégia de descarbonização do setor de transportes, porém impõe desafios ambientais associados ao ciclo de vida das baterias de íons de lítio, especialmente em sua fase de pós-consumo. Este estudo analisa a gestão ambiental dessas baterias ao fim da vida útil, com ênfase na estruturação da logística reversa e na consolidação de cadeias de fornecimento responsáveis. A partir de revisão bibliográfica e análise normativa, discutem-se lacunas regulatórias, infraestrutura de coleta e tratamento, rastreabilidade de materiais críticos e a responsabilidade compartilhada entre os agentes da cadeia. Os resultados indicam que a ausência de sistemas estruturados de retorno e reaproveitamento pode gerar riscos de contaminação ambiental e intensificar a pressão sobre a extração de recursos minerais. Conclui-se que a efetividade ambiental da mobilidade elétrica depende da implementação de modelos circulares integrados à governança da cadeia produtiva.

Introdução

A mobilidade elétrica tem sido amplamente promovida como estratégia de mitigação das emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes, historicamente dependente de combustíveis fósseis e responsável por parcela significativa das emissões globais (COSTA; RIBEIRO, 2021; IPCC, 2023). Nesse contexto, a expansão dos veículos elétricos (VE) é frequentemente associada à descarbonização dos sistemas energéticos e à transição para padrões mais sustentáveis de mobilidade (IEA, 2024). No entanto, a efetividade ambiental dessa transição não pode ser analisada apenas sob a ótica das emissões diretas na fase de uso, sendo necessária uma abordagem baseada no ciclo de vida, que considere impactos associados à extração de matérias-primas, produção, utilização e destinação final dos componentes tecnológicos, especialmente das baterias de íons de lítio (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017; HAWKINS et al., 2013).

As baterias constituem o principal componente tecnológico dos VE e concentram impactos ambientais significativos relacionados à extração de minerais críticos, ao elevado consumo energético na manufatura e aos potenciais riscos de contaminação associados ao manejo inadequado no pós-consumo (IEA, 2023; ZENG; LI; LIU, 2015). A mineração de recursos como lítio, cobalto e níquel, essenciais para a produção dessas baterias, tem sido associada a pressões ambientais relevantes, incluindo degradação de ecossistemas, elevado consumo hídrico e geração de resíduos minerais (SONNENSCHEIN; MUNDACA, 2021; IEA, 2024). Estudos de avaliação de ciclo de vida indicam que a etapa de produção das baterias pode representar parcela significativa da pegada de carbono total dos veículos elétricos, evidenciando a necessidade de estratégias de gestão ambiental que considerem toda a cadeia produtiva (IEA, 2024; ROMARE; DAHLQUIST, 2017)

Durante a fase de uso, ocorre a degradação progressiva da capacidade de armazenamento das baterias, tornando inevitável sua substituição ao atingirem o fim da vida útil (EoL – *end of life*). Projeções indicam que, nas próximas décadas, um volume expressivo dessas baterias ingressará na fase pós-consumo, ampliando a demanda por sistemas estruturados de coleta, transporte, triagem, reaproveitamento e reciclagem (GONZALES-CALIENES et al., 2022). A ausência de mecanismos adequados de gestão pode resultar em riscos ambientais significativos, como contaminação do solo e da água por metais potencialmente tóxicos, emissões associadas a processos informais de tratamento e intensificação da pressão sobre a mineração de recursos estratégicos (ZENG; LI; LIU, 2015; UNEP, 2019).

Nesse contexto, a logística reversa emerge como instrumento fundamental para a engenharia ambiental ao possibilitar o retorno controlado das baterias à cadeia produtiva, favorecendo a recuperação de materiais críticos, a redução da geração de resíduos e o uso mais eficiente de recursos naturais (LEITE, 2009). Essa abordagem está diretamente alinhada aos princípios da economia circular, que propõem a manutenção do valor dos materiais e produtos no sistema econômico pelo maior tempo possível, minimizando perdas e impactos ambientais ao longo do ciclo de vida (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013; GEISSDOERFER et al., 2017).

No contexto brasileiro, a Lei n.º 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e reconhece a logística reversa como instrumento de política ambiental (BRASIL, 2010). Contudo, persistem lacunas normativas e operacionais específicas para a cadeia de baterias de veículos elétricos, especialmente no que se refere à infraestrutura de tratamento, rastreabilidade e definição clara de responsabilidades entre fabricantes, importadores e distribuidores (ALMEIDA; FERREIRA, 2022). Esse cenário evidencia a necessidade de integração entre regulação ambiental, governança da cadeia de suprimentos e estratégias de economia circular voltadas à mitigação de impactos e à promoção do uso sustentável de recursos naturais.

Diante desse contexto, o presente estudo tem por objetivo analisar a gestão ambiental das baterias de veículos elétricos ao fim da vida útil, enfatizando o papel da logística reversa na consolidação de cadeias de fornecimento responsáveis. A pesquisa adota abordagem exploratória, baseada em levantamento bibliográfico estruturado e análise normativa, buscando identificar desafios estruturais, riscos ambientais e oportunidades para o fortalecimento da sustentabilidade na cadeia produtiva da mobilidade elétrica.

Metodologia

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza exploratória e descritiva, com abordagem qualitativa, orientada pela análise ambiental do ciclo de vida das baterias de veículos elétricos em sua fase de fim de vida útil. A investigação foi conduzida por meio de levantamento bibliográfico estruturado e análise documental normativa, com ênfase nos instrumentos de gestão ambiental aplicáveis à logística reversa e à governança de cadeias de fornecimento no contexto da economia circular.

A etapa de busca bibliográfica foi realizada nas bases ScienceDirect e Scopus, utilizando combinações de termos relacionados à gestão de resíduos, economia circular e baterias de veículos elétricos. Empregou-se a string de busca ("waste management" AND "electric vehicle battery" AND "circular economy"), resultando inicialmente em 23 registros, dos quais 17 artigos científicos foram selecionados após a aplicação de filtros por tipo de documento e relevância temática. Os estudos considerados foram publicados entre 2019 e 2025 e abordam principalmente aspectos ambientais, desafios de gestão de resíduos tecnológicos, modelos de circularidade e implicações para cadeias reversas de baterias de íons de lítio. O número reduzido de publicações identificadas evidencia que a integração entre gestão ambiental, economia circular e baterias de veículos elétricos ainda constitui um campo em consolidação científica.

Paralelamente, procedeu-se à análise de documentos normativos e relatórios institucionais, com destaque para a Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, bem como diretrizes regulatórias nacionais e internacionais relacionadas à gestão de resíduos perigosos, responsabilidade compartilhada e rastreabilidade de materiais críticos. Essa etapa teve como finalidade compreender o conjunto regulatório que condiciona a gestão ambiental das baterias no contexto brasileiro e estabelecer diálogo com práticas internacionais consolidadas.

Os dados coletados foram examinados por meio de análise qualitativa interpretativa, orientada por critérios ambientais previamente definidos, incluindo: (i) potenciais impactos ao solo e aos recursos hídricos decorrentes do descarte inadequado, (ii) emissões associadas ao ciclo de vida e aos processos de tratamento, e (iii) eficiência na recuperação de materiais críticos e na redução da demanda por recursos primários. A análise também considerou aspectos relacionados ao balanço energético dos processos, compreendido como a relação entre o consumo de energia nas etapas de coleta, transporte e tratamento e a energia potencialmente recuperada ou economizada por meio da reciclagem e do reaproveitamento das baterias, bem como à gestão de resíduos perigosos. A partir desses critérios, buscou-se identificar convergências teóricas, lacunas regulatórias e desafios estruturais associados à implementação de sistemas de logística reversa ambientalmente adequados. Com base nessa interpretação, foram delineadas implicações para o fortalecimento de modelos circulares e para a consolidação de sistemas de gestão ambiental aplicados à mobilidade elétrica.

Resultados

O crescimento acelerado da mobilidade elétrica tem implicações ambientais que transcendem a redução das emissões diretas durante a fase de uso dos veículos. Os dados indicam que a frota global de veículos elétricos ultrapassou 45 milhões de unidades, refletindo expansão exponencial na última década (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2024). No Brasil, observa-se crescimento contínuo da frota, com taxas superiores a 50% ao ano (ABVE, 2025). Essa dinâmica projeta, para os próximos anos, o ingresso de um volume expressivo de baterias de íons de lítio na fase de fim de vida útil, configurando um potencial passivo ambiental associado à presença de metais pesados, eletrólitos inflamáveis e componentes químicos de elevada complexidade (ALI et al., 2025).

Sob a perspectiva da engenharia ambiental, o desafio central não reside apenas na expansão da frota, mas na capacidade institucional e técnica de evitar que esse fluxo se converta em fonte de contaminação do solo, da água e do ar. A ausência de sistemas estruturados de retorno e tratamento pode intensificar riscos ambientais e ampliar a pressão sobre a extração primária de recursos minerais críticos, como lítio, níquel e cobalto, cuja exploração está associada a impactos ecossistêmicos relevantes (WANG, 2023; VON DELFT; WESSELKÄMPER; LUX, 2023). Nesse contexto, a logística reversa deve ser compreendida como instrumento de gestão ambiental, voltado à mitigação de riscos e à redução de externalidades negativas ao longo do ciclo de vida das baterias.

A fim de evidenciar de maneira comparativa os efeitos ambientais associados à presença ou ausência de uma cadeia estruturada de logística reversa, apresenta-se a Tabela 1. A sistematização busca demonstrar que a sustentabilidade da mobilidade elétrica não depende exclusivamente da eletrificação da frota, mas da consolidação de mecanismos capazes de controlar o fluxo pós-consumo das baterias. A análise comparativa permite visualizar como a inexistência de sistemas estruturados pode converter um avanço tecnológico em potencial passivo ambiental.

Aspecto	Sem a logística reversa estruturada	Com a logística reversa estruturada	Referências
Destinação final	Risco de descarte irregular	Tratamento ambientalmente adequado	Zeng, Li e Liu (2015); UNEP (2019)
Recursos minerais	Nova mineração necessária	Recuperação de materiais críticos	IEA (2024); Ali et al. (2025)
Emissões	Produção intensiva em carbono	Redução da pegada via reciclagem	Hawkins et al. (2013); Von Delft et al. (2023)
Resíduos perigosos	Acúmulo e risco de contaminação	Controle e mitigação ambiental	Slattery et al. (2021); Mohiuddin et al. (2025)

Tabela 1: Implicações ambientais da ausência e da implementação de logística reversa estruturada para baterias de veículos elétricos

A comparação evidencia que a logística reversa exerce função determinante na conversão de riscos ambientais em oportunidades de mitigação. Na ausência de estrutura adequada, observam-se riscos de descarte irregular, intensificação da mineração primária e ampliação da pegada de carbono associada à produção de novas baterias. Em contrapartida, quando integrada a sistemas de rastreabilidade, triagem e reciclagem, a cadeia reversa contribui para a recuperação de materiais críticos, redução de emissões e controle de resíduos perigosos. Assim, a mobilidade elétrica somente alcança efetividade ambiental plena quando articulada a mecanismos estruturados de governança e circularidade material.

A operacionalização dessa gestão envolve desafios estruturais que possuem implicações ambientais diretas. A coleta descentralizada e a rastreabilidade inadequada comprometem o controle sobre o destino final das baterias, elevando o risco de descarte irregular ou armazenamento inadequado (MOHIUDDIN; BAI; MO, 2025). O transporte dessas unidades, classificadas como resíduos perigosos, exige conformidade com normas específicas e infraestrutura apropriada, de modo a evitar vazamentos, incêndios e emissões associadas (SLATTERY; DUNN; KENDALL, 2021). A triagem técnica, por sua vez, é determinante para definir se a bateria seguirá para recondicionamento, segunda vida ou reciclagem, influenciando diretamente o potencial de recuperação de materiais e a redução de resíduos (GONZALES-CALIENES et al., 2022).

As tecnologias de reciclagem, baseadas em processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos ou métodos diretos, têm como objetivo recuperar metais críticos e reinseri-los na cadeia produtiva, reduzindo a necessidade de mineração primária (ALI et al., 2025). Sob a ótica da sustentabilidade, a eficiência desses processos deve ser avaliada não apenas economicamente, mas também em termos de balanço energético, emissões associadas e capacidade de redução do impacto ambiental global da cadeia.

A extensão do ciclo de uso por meio de aplicações de segunda vida constitui alternativa ambientalmente relevante. Baterias que ainda mantêm entre 70% e 80% de sua capacidade podem ser direcionadas para armazenamento estacionário de energia, contribuindo para a integração de fontes renováveis e para a estabilidade de sistemas elétricos distribuídos (HE et al., 2020). Essa estratégia reduz a demanda por novos materiais e posterga o descarte, alinhando-se aos princípios da economia circular (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017; GEISSDOERFER et al., 2017). Contudo, sua viabilidade depende de sistemas de rastreabilidade, padronização técnica e segurança regulatória, especialmente no contexto brasileiro, onde ainda existem lacunas normativas específicas (OLIVEIRA; MENDES, 2022).

Para sintetizar a dinâmica ambiental associada ao ciclo de vida das baterias de veículos elétricos, apresenta-se a Figura 1, que representa conceitualmente o fluxo circular desde a extração de recursos minerais até a reinserção de materiais recuperados na cadeia produtiva. A representação busca evidenciar a transição do modelo linear extrair-produzir-descartar para uma lógica de circularidade material orientada pela sustentabilidade.



Figura 1: Ciclo ambiental das baterias de veículos elétricos na lógica da economia circular
Fonte: Adaptado de Ellen MacArthur Foundation (2013); Kirchherr, Reike e Hekkert (2017);

A representação esquemática demonstra que a sustentabilidade da mobilidade elétrica depende da articulação contínua entre produção, uso, reuso e reciclagem. A interrupção de qualquer etapa compromete a circularidade e reintroduz características do modelo linear, ampliando impactos ambientais. Assim, a logística reversa atua como elemento de conexão estrutural do sistema, assegurando a reintegração de materiais críticos e contribuindo para a redução sistêmica da pegada ambiental da cadeia produtiva. A incorporação de estratégias de segunda vida e reciclagem permite reduzir a dependência de mineração primária, mitigar riscos ambientais e fortalecer cadeias de fornecimento responsáveis, alinhando-se aos princípios da economia circular (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017).

A consolidação de uma cadeia ambientalmente adequada de gestão de baterias requer integração entre infraestrutura técnica, governança regulatória e inovação tecnológica. Experiências internacionais, como o Regulamento Europeu de Baterias, estabelecem metas de recuperação de materiais e exigências de rastreabilidade ao longo de todo o ciclo de vida (EUROPEAN COMMISSION, 2023), demonstrando que instrumentos regulatórios robustos são fundamentais para internalizar responsabilidades ambientais. No Brasil, a implementação efetiva da Política Nacional de Resíduos Sólidos demanda maior especificidade para o setor de baterias de veículos elétricos, bem como articulação entre fabricantes, importadores, operadores logísticos e órgãos ambientais.

Sob a perspectiva sistêmica, a sustentabilidade da mobilidade elétrica pode ser compreendida a partir da integração entre os benefícios ambientais inerentes aos veículos elétricos e aqueles decorrentes da gestão circular das baterias. A Tabela 2 sistematiza essas contribuições, demonstrando que os ganhos ambientais não se restringem à fase de uso dos veículos, mas dependem da estruturação de cadeias produtivas responsáveis ao longo de todo o ciclo de vida.

Dimensão Ambiental	Veículos Elétricos	Gestão Circular das Baterias	Referências
Emissões de Gases de Efeito Estufa	Redução de emissões diretas no uso	Redução da pegada de carbono via reciclagem e reaproveitamento	IPCC (2023); IEA (2024); Hawkins et al. (2013); Von Delft et al. (2023)
Recursos Naturais	Menor consumo de combustíveis fósseis	Recuperação de lítio, níquel e cobalto	IEA (2024); Ali et al. (2025); Zeng, Li e Liu (2015); Harper et al. (2019)

Resíduos	Eliminação de resíduos de óleo e combustão	Redução de resíduos perigosos por logística reversa	UNEP (2019); Gonzales-Calienes et al. (2022); Mohiuddin et al. (2025); Lv et al. (2018)
Energia	Integração com fontes renováveis	Segunda vida para armazenamento estacionário	He et al. (2020); IEA (2024); Bobba et al. (2018)
Governança	Incentivos à transição energética	Responsabilidade compartilhada e rastreabilidade	European Commission (2023); Kirchherr et al. (2017); Geissdoerfer et al. (2017)

Tabela 2: Contribuições ambientais dos veículos elétricos e da gestão circular de baterias ao longo do ciclo de vida

A sistematização apresentada reforça que a redução de emissões diretas constitui apenas uma dimensão do desempenho ambiental dos veículos elétricos. A recuperação de metais críticos, a mitigação de resíduos perigosos e a extensão do ciclo de uso por meio de aplicações de segunda vida ampliam significativamente o potencial de sustentabilidade do sistema. Dessa forma, a mobilidade elétrica deve ser analisada como arranjo tecnológico e ambiental integrado, no qual inovação, regulação e logística reversa operam de maneira interdependente.

Os desafios estruturais brasileiros incluem limitações de infraestrutura regionalizada, custos elevados de transporte reverso em função da dimensão territorial e insuficiência de centros especializados de tratamento (ALMEIDA; FERREIRA, 2022). Entretanto, tais desafios também representam oportunidades para o desenvolvimento de soluções sustentáveis baseadas em digitalização, rastreabilidade avançada e planejamento territorial integrado (ZHANG; CHEN; LI, 2022). A incorporação de tecnologias de monitoramento e gestão de dados pode ampliar a transparência da cadeia e fortalecer mecanismos de responsabilidade compartilhada, reduzindo riscos ambientais e aumentando a eficiência dos fluxos reversos.

Assim, a gestão ambiental das baterias de veículos elétricos deve ser compreendida como componente estruturante da sustentabilidade da mobilidade elétrica. A efetividade da transição energética depende não apenas da substituição de combustíveis fósseis, mas da capacidade de estruturar cadeias de fornecimento responsáveis, capazes de minimizar impactos, recuperar recursos e promover a circularidade material ao longo de todo o ciclo de vida.

Discussões

Os resultados evidenciam que a expansão da mobilidade elétrica, embora fundamental para a descarbonização do setor de transportes, não pode ser analisada de forma isolada da gestão ambiental das baterias de íons de lítio ao fim da vida útil. A transição energética, quando dissociada de mecanismos estruturados de retorno e reaproveitamento, pode deslocar impactos ambientais da fase de uso para as etapas de extração mineral e disposição final, configurando um processo de transferência de externalidades ao longo da cadeia produtiva. Nesse sentido, a sustentabilidade da mobilidade elétrica depende da incorporação de princípios de economia circular e da consolidação de cadeias de fornecimento responsáveis (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017; GEISSDOERFER et al., 2017).

A literatura internacional demonstra que países que estruturaram políticas específicas para baterias, com metas obrigatórias de recuperação e sistemas de rastreabilidade digital, apresentam maior eficiência na reinserção de materiais críticos na cadeia produtiva (EUROPEAN COMMISSION, 2023; ZHANG; CHEN; LI, 2022). Tais instrumentos contribuem para a redução da dependência de mineração primária e para a mitigação de impactos socioambientais associados à exploração de lítio, níquel e cobalto. No contexto brasileiro, entretanto, ainda se observa ausência de regulamentação específica para baterias de veículos elétricos, o que pode comprometer a efetividade da Política Nacional de Resíduos Sólidos na internalização de responsabilidades ambientais.

Outro aspecto relevante refere-se à viabilidade ambiental das estratégias de segunda vida. Embora o reuso em aplicações estacionárias representa alternativa promissora para prolongar o ciclo de uso e reduzir a geração de resíduos, sua efetividade depende da existência de protocolos técnicos padronizados, avaliação de segurança e integração com sistemas energéticos renováveis (HE et al., 2020; GONZALES-CALIENES et al., 2022). Sem essas condições, há risco de criação de um estoque temporário de resíduos postergados, que apenas adiam, mas não resolvem o problema ambiental estrutural.

Adicionalmente, a dimensão territorial brasileira impõe desafios logísticos que impactam diretamente a sustentabilidade ambiental da cadeia reversa. Longas distâncias de transporte podem aumentar emissões associadas e comprometer o balanço ambiental do processo, especialmente na ausência de planejamento regionalizado de centros de tratamento (ALMEIDA; FERREIRA, 2022). Nesse contexto, a adoção de hubs regionais e sistemas digitais de rastreabilidade pode reduzir ineficiências e ampliar a transparência dos fluxos reversos (WANG, 2023; MOHIUDDIN; BAI; MO, 2025).

A análise também indica que a gestão ambiental das baterias deve ser compreendida como componente estratégico da governança climática. A descarbonização do transporte não se limita à substituição de motores a combustão por sistemas

elétricos, mas envolve a redução sistêmica de impactos ao longo de todo o ciclo de vida dos componentes. Estudos recentes apontam que a recuperação eficiente de materiais críticos pode reduzir significativamente a pegada de carbono associada à produção de novas baterias (VON DELFT; WESSELKÄMPER; LUX, 2023). Dessa forma, a logística reversa assume papel estruturante na consolidação de uma mobilidade efetivamente sustentável.

Por fim, observa-se que a consolidação de cadeias de fornecimento responsáveis requer integração entre instrumentos regulatórios, inovação tecnológica e responsabilidade compartilhada entre os agentes econômicos. A ausência de coordenação pode resultar em assimetrias regionais, descarte inadequado e perda de valor ambiental e econômico. Assim, a engenharia ambiental deve atuar não apenas na proposição de soluções técnicas de reciclagem, mas também na formulação de modelos integrados de gestão que articulem sustentabilidade, eficiência material e justiça intergeracional.

Conclusão

A análise desenvolvida ao longo deste estudo evidencia que a expansão da mobilidade elétrica, embora essencial para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes, impõe desafios ambientais complexos associados ao ciclo de vida das baterias de íons de lítio. A fase de fim de vida útil dessas baterias representa um ponto crítico da sustentabilidade do sistema, pois concentra riscos potenciais de contaminação ambiental, pressão sobre recursos minerais estratégicos e fragilidades regulatórias ainda presentes no contexto brasileiro.

Os resultados demonstram que a logística reversa não deve ser compreendida apenas como mecanismo operacional de retorno de resíduos, mas como instrumento estruturante de gestão ambiental e de consolidação de cadeias de fornecimento responsáveis. A ausência de infraestrutura adequada, de sistemas de rastreabilidade integrados e de regulamentação específica para baterias de veículos elétricos pode comprometer a efetividade ambiental da transição energética, deslocando impactos ao longo da cadeia produtiva e gerando novas externalidades.

Sob a perspectiva da engenharia ambiental, a estruturação de modelos circulares para o setor de baterias exige integração entre planejamento territorial, inovação tecnológica e governança regulatória. A adoção de centros regionais de triagem e reciclagem, aliada à implementação de sistemas digitais de monitoramento e rastreabilidade, apresenta-se como estratégia relevante para reduzir riscos ambientais, otimizar fluxos logísticos e ampliar a recuperação de materiais críticos. Além disso, a incorporação de aplicações de segunda vida, quando respaldada por protocolos técnicos e marcos regulatórios claros, pode contribuir para a redução da geração de resíduos e para a integração com sistemas de energia renovável.

No contexto brasileiro, observa-se que a Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece diretrizes gerais para a responsabilidade compartilhada, mas ainda carece de instrumentos específicos voltados à cadeia de baterias de veículos elétricos. O fortalecimento da regulação setorial, inspirado em experiências internacionais, pode favorecer a internalização de custos ambientais, a ampliação da transparência da cadeia produtiva e a consolidação de práticas alinhadas à economia circular.

Conclui-se, portanto, que a sustentabilidade da mobilidade elétrica depende da adoção de uma abordagem sistêmica, capaz de articular descarbonização, gestão ambiental de resíduos tecnológicos e recuperação eficiente de recursos. A efetividade dessa transição não se restringe à substituição de combustíveis fósseis, mas envolve a reconfiguração estrutural das cadeias produtivas sob princípios de circularidade, responsabilidade ambiental e justiça intergeracional. Nesse sentido, a logística reversa de baterias de veículos elétricos emerge como elemento estratégico para assegurar que a mobilidade elétrica represente, de fato, um avanço ambiental e não apenas uma mudança tecnológica.

Referências Bibliográficas

ABVE. Relatório anual 2025. Associação Brasileira do Veículo Elétrico, 2025. Disponível em: https://www.abve.org.br.

ALI, A. et al. Sustainable recycling of end-of-life electric vehicle batteries: EV battery recycling frameworks in China and the USA. *Recycling*, v. 10, n. 2, p. 68, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/recycling10020068.

ALMEIDA, G.; FERREIRA, A. Gestão ambiental de baterias de íon-lítio: panorama e perspectivas. *Revista de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 12, n. 1, p. 22–37, 2022.

ALMEIDA, L.; FERREIRA, M. Desafios regulatórios para a logística reversa de baterias de veículos elétricos no Brasil. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 11, n. 2, p. 1–15, 2022.

BOBBA, S.; MATHIEUX, F.; ARDENTE, F.; et al. Life cycle assessment of repurposed electric vehicle batteries for stationary energy storage. *Journal of Energy Storage*, v. 19, p. 212–225, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.est.2018.07.015

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

COSTA, L.; RIBEIRO, A. Mobilidade elétrica e descarbonização do setor de transportes: desafios e oportunidades. *Revista Brasileira de Energia*, v. 27, n. 3, p. 45–60, 2021.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2013.

EUROPEAN COMMISSION. Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council on batteries and waste batteries. *Official Journal of the European Union*, 2023.

GEISSDOERFER, M. et al. The circular economy – a new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 757–768, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 757–768, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048

GONZALES-CALIENES, A.; et al. End-of-life lithium-ion batteries from electric vehicles: challenges and opportunities for recycling and second-life applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 159, 2022.

GONZALES-CALIENES, J. L.; MOREIRA, M. T.; FEIJOO, G. Spatial modeling of reverse logistics for end-of-life electric vehicle batteries: integrating life cycle assessment and GIS analysis. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 182, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106281.

HARPER, G.; SOMERVILLE, R.; KENDALL, A.; et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, v. 575, p. 75–86, 2019. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5

HAWKINS, T. R.; SINGH, B.; MIKKELI, K.; STRØMMAN, A. H. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, v. 17, n. 1, p. 53–64, 2013. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x

HE, M.; LIN, T.; WU, X.; LUO, J.; PENG, Y. A systematic literature review of reverse logistics of end-of-life vehicles: bibliometric analysis and research trend. *Energies*, v. 13, n. 21, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/en13217014.

IEA – International Energy Agency. *Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions*. Paris: IEA, 2023.

IEA – International Energy Agency. *Global EV Outlook 2024*. Paris: IEA, 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global EV Outlook 2024. Paris: IEA, 2024.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva: IPCC, 2023.wang

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 127, p. 221–232, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

LEITE, P. R. Logística reversa: meio ambiente e competitividade. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

LV, W.; WANG, Z.; CAO, H.; et al. A critical review and analysis on the recycling of spent lithium-ion batteries. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 6, n. 2, p. 1504–1521, 2018. DOI: https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03811

MOHIUDDIN, M. D.; BAI, L.; MO, W. Reverse logistics for electric vehicle batteries: a systematic review. *Journal of Cleaner Production*, v. 437, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.142987.

OLIVEIRA, D.; MENDES, R. Economia circular e mobilidade elétrica no Brasil. *Gestão & Produção*, v. 29, 2022.

ROMARE, M.; DAHLQUIST, E. The life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions from lithium-ion batteries. *Journal of Cleaner Production*, v. 165, p. 100–113, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.186

SLATTERY, M.; DUNN, J.; KENDALL, A. Transportation of electric vehicle lithium-ion batteries at end-of-life: a literature review. Davis: National Center for Sustainable Transportation, University of California, 2021.

SONNENSCHEIN, J.; MUNDACA, L. Decarbonization under green growth strategies? The case of electric mobility. *Energy Policy*, v. 155, 2021.

UNEP – United Nations Environment Programme. *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want*. Nairobi: UNEP, 2019.

VON DELFT, S.; WESSELKÄMPER, J.; LUX, S. Recycling or second use? Supply potentials and climate effects of end-of-life electric vehicle batteries. *Environmental Science & Technology*, 2023. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.5c01823.

WANG, T. Research on the recycling methods for lithium-ion batteries in the electric vehicle industry. *Advances in Circular Economy*, v. 7, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.adce.2023.100078.

ZENG, X.; LI, J.; LIU, L. Solving spent lithium-ion battery problems in China: opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 52, p. 1759–1767, 2015.

ZHANG, L.; CHEN, Y.; LI, J. Reverse logistics and traceability of new energy vehicle batteries in China: policy framework and challenges. *Waste Management*, v. 153, p. 112–124, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.09.001.

PROPOSTA DE LOGÍSTICA REVERSA PARA O ÓLEO VEGETAL RESIDUAL DOMÉSTICO EM ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE SANTO ANTÔNIO DA PATRULHA/RS

1 Luyhana Costa Gessi, 2 Anelise Nardi Huffner, 3 Maria Cristina de Almeida Silva

1 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, e-mail: luyhanacg@gmail.com; 2 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, e-mail: ane.huffner@gmail.com; 3 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, e-mail: maria.almeida@ufrgs.br

Palavras-chave: Reciclagem; Óleo Vegetal Residual; Logística Reversa.

Resumo

A gestão de resíduos sólidos no Brasil ainda é um desafio. O descarte inadequado do Óleo Vegetal Residual (OVR) gera impactos ambientais severos: obstrui tubulações, sobrecarrega sistemas de tratamento de efluente, contamina solos e corpos hídricos, comprometendo a biodiversidade e a qualidade do meio. Neste cenário, o presente estudo abordou o problema da destinação inadequada do OVR gerado em domicílios, com o objetivo de propor uma logística reversa para a área urbana do município de Santo Antônio da Patrulha/RS. Assim, foi realizada uma análise ambiental que mapeou o uso e ocupação do solo e as áreas de proteção, com uso do Software QGIS, para compreensão das vulnerabilidade do local. Após, foi feito o levantamento histórico e da situação atual do gerenciamento do OVR no município, que confirmou a fragilidade de sistemas anteriores e a ausência de uma estrutura robusta da logística reversa atualmente, com apenas um Ponto de Entrega Voluntária (PEV) e sem nenhuma destinação publicada. A quantificação do resíduo, baseada em dados populacionais do IBGE e índices técnicos da literatura, estimou uma geração de 7.864,3 L/mês de OVR em 2025, com projeção para 9.336,5 L/mês no ano de 2055, denotando um aumento de 19%. Os dados atuais foram espacializados com o QGIS, por setor censitário, para identificar as áreas de maior concentração de geração e otimizar o planejamento da coleta, sendo propostos a implantação de 26 novas PEVs. O trabalho propôs-se um modelo de logística reversa, definindo os agentes responsáveis e a localização espacial. O modelo apresentado valora o OVR através da fabricação de produtos de limpeza, via saponificação, possibilitando uma solução socioambiental para a reciclagem desse resíduo no município.

Introdução

A gestão inadequada dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) configura-se como um dos principais desafios ambientais enfrentados pela sociedade contemporânea, demandando soluções que transcendam o modelo linear de produção-consumo-descarte (SIMAN, YAMANE e DUTRA, 2023). No Brasil, no ano de 2024, foram geradas 81,6 milhões de toneladas de RSUs, denotando um aumento de 0,75% em relação a 2023. Fazendo uma média do volume total de RSU gerado, seria equivalente a 384 kg por habitante por ano ou 1,241 kg por dia, segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2025 (ABREMA, 2025). Ainda em 2024, apenas 8,7% do RSU gerado no país foi enviado à reciclagem, totalizando 7,1 milhões de toneladas de resíduos secos. Porém, desse valor, somente 2,5 milhões de toneladas (52%) foram recuperadas, e o restante foi encaminhado para disposição final como rejeito (ABREMA, 2025).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), estabelece diretrizes e obrigações para a gestão integrada e o gerenciamento de resíduos, enfatizando a hierarquia que prioriza a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento, com destinação final apenas para rejeitos. Conforme salienta o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Santo Antônio da Patrulha, antes de praticar a disposição final dos RSU, preferencialmente deve-se segregar os resíduos recicláveis e encaminhá-los para beneficiamento e reciclagem. Ou seja, é de suma importância que o município possua sistemas capazes de gerar produtos, antes resíduos, com valor econômico agregado. O Plano recomenda projetos integrados de logística reversa, através de ações coletivas entre os municípios do âmbito da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos (KEYASSOCIADOS, 2012).

Neste contexto, a transição para uma economia circular é interessante pois propõe a manutenção dos recursos em ciclos de uso pelo maior tempo possível, reintroduzindo resíduos como insumos para novos processos produtivos (MÜLLER, 2020). Entre os resíduos com potencial para logística reversa, destaca-se o óleo vegetal residual (OVR), proveniente dos processos de fritura em residências, estabelecimentos comerciais e indústrias alimentícias.

Conforme levantamento da ABIOVE (Associação Brasileira de Indústria de Óleos Vegetais), apresentado no Jornal O Estado de São Paulo, o consumo de óleo vegetal no Brasil, no ano de 2019, foi de 4,9 bilhões de litros. Porém, dos 1,17 bilhão de litros de OVR que poderiam ter sido reciclados, apenas 108 milhões de litros de OVR foram destinados para reciclagem, considerando a proporção de que do valor consumido de óleo, 25% pode se tornar resíduo (ROCHA, 2021). No descarte incorreto na natureza, este óleo é um resíduo com alto potencial poluidor. A população, por falta de conhecimento ou de iniciativas de reciclagem, muitas vezes, realiza o descarte no solo e na rede de esgoto sanitário (como o ralo da pia).

A contaminação do OVR na água se dá devido à formação de uma película superficial que impede a troca gasosa, comprometendo o oxigênio dissolvido e afetando a vida aquática (MOTA et al, 2023). Além do impacto hídrico, o OVR causa o entupimento das redes coletoras, incrustação de gordura nas tubulações, e aumento dos custos operacionais de saneamento nas

Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), aumentando o gasto público e gerando transtornos com a manutenção. No solo, o descarte do OVR causa impermeabilização, impedindo a infiltração da água e prejudicando a vegetação, além do potencial de contaminação dos lençois freáticos. Em municípios de pequeno porte, como Santo Antônio da Patrulha (SAP), no estado do Rio Grande do Sul, a carência de uma economia circular estruturada e de alternativas engajadoras da sociedade contribui para a persistência do descarte irregular.

A destinação adequada do OVR, transformando-o em um produto de valor agregado, representa um desafio técnico e de gestão que alinha a conformidade legal com a oportunidade social e econômica. Assim, a presente pesquisa justifica-se pela necessidade de propor soluções de engenharia ambiental que promovam a sustentabilidade em nível municipal, aplicando os conhecimentos obtidos na universidade para contribuir ativamente na comunidade. A implementação de uma logística circular do OVR gerado nos domicílios, via saponificação (que é o processo de conversão do óleo em produtos de limpeza), transforma um resíduo com potencial poluente em um produto com valor agregado.

Essa proposta possibilita a inserção do município no ciclo da economia circular, envolvendo a comunidade como ferramenta engajadora da solução e trazendo os resultados positivos para efeito local. Assim, o objetivo do trabalho é propor a logística reversa para o óleo vegetal residual, gerado em domicílios, através da produção de produtos de limpeza, para a área urbana do município de Santo Antônio da Patrulha/RS.

Metodologia

O município de Santo Antônio da Patrulha (SAP) está localizado na região metropolitana do estado do Rio Grande do Sul, inserido na mesorregião Metropolitana de Porto Alegre. Possui uma área total de aproximadamente 1.049,3 km² e está situado na porção leste do estado, a cerca de 90 km da capital, Porto Alegre. O município faz limite com as cidades de Osório, Capivari do Sul, Viamão, Glorinha, Taquara, Rolante, Riozinho e Caraá. Na Figura 1, observa-se a localização geográfica do município, no contexto regional.

O município de Santo Antônio da Patrulha (SAP) está localizado na região metropolitana do estado do Rio Grande do Sul, inserido na mesorregião Metropolitana de Porto Alegre. Possui uma área total de aproximadamente 1.049,3 km² e está situado na porção leste do estado, a cerca de 90 km da capital, Porto Alegre. O município faz limite com as cidades de Osório, Capivari do Sul, Viamão, Glorinha, Taquara, Rolante, Riozinho e Caraá. Na Figura 1, observa-se a localização geográfica do município, no contexto regional.

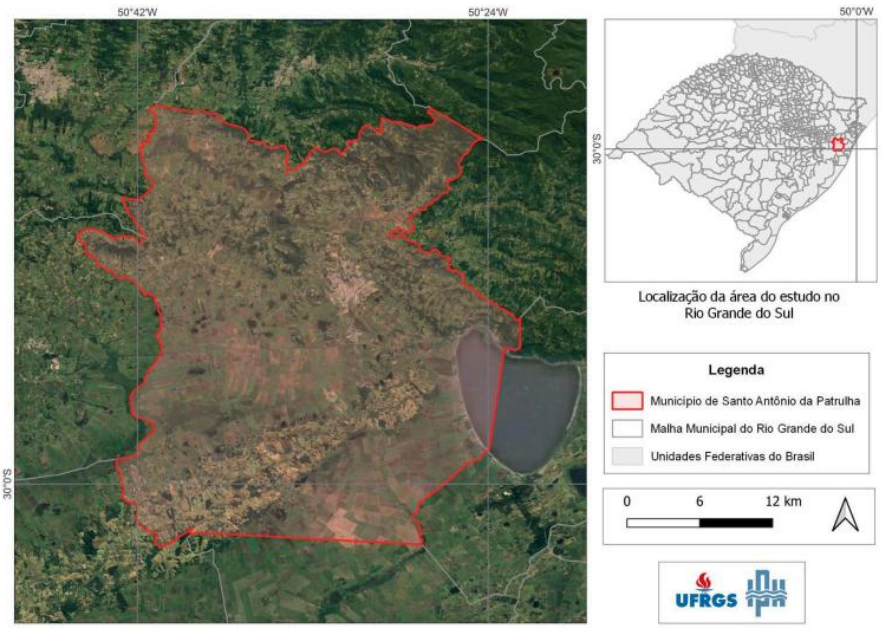


Figura 1 - Localização geográfica Santo Antônio da Patrulha - RS.

De acordo com os dados do último Censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), ocorrido em 2022, Santo Antônio da Patrulha possui uma população de 42.947 habitantes e uma densidade demográfica de aproximadamente 40,9 hab/km². Sua economia está baseada principalmente na agropecuária e nas atividades industriais e a população estimada pelo IBGE, para 2025, foi de 44.431 habitantes.

Estimativa de geração de óleo residual

Madalozo (2008), por meio da composição de vários procedimentos metodológicos, encontrou valores do consumo médio ponderado de óleo vegetal de soja (em litros por pessoa), para alimentação, assim como a geração ponderada do óleo vegetal residual de soja (em litros por pessoa), e a relação em porcentagem dos dois valores. Os valores são apresentados na Figura 2 e serão usados para as estimativas no município de SAP - RS.

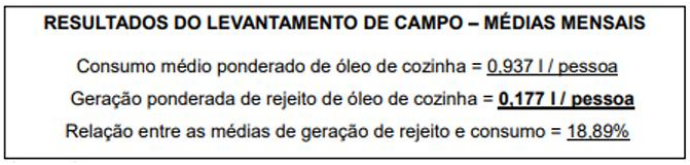


Figura 2 - Valores de referência, de consumo de óleo vegetal e geração de OVR.
Fonte: MADALOZO, 2008.

Devido a cidade ter maior representatividade populacional em sua zona urbana (70,84% da população reside em zona urbana, de acordo com o IBGE, 2010), em comparação com a rural, o foco da logística reversa irá se dar na área urbana central. Essa escolha baseou-se na otimização dos resultados e maior efetivação na proposta de logística, já que existe maior concentração populacional nessa região, e consequente maior geração de resíduos. Considerou-se, também, que a população rural, ou de áreas mais periféricas da cidade, acabam se deslocando, vez por outra, ao centro da cidade (como idas ao mercado, consultas médicas e escola), e com uma conscientização ambiental eficiente da campanha de logística reversa, podem levar o óleo gerado em algum ponto de entrega voluntária central. Assim, essa avaliação foi realizada considerando dados de densidade demográfica e área dos setores censitários urbanos centrais de SAP – RS (IBGE, 2025).

Projeção para 30 anos

Para a estimativa de geração de OVR com projeção para 30 anos, foi necessário estimar a população para esse ano futuro. As projeções populacionais são fundamentais para o planejamento de políticas públicas e o desenvolvimento de projetos de saneamento básico, como de resíduos sólidos. Elas fornecem dados essenciais para o dimensionamento das infraestruturas e para o cálculo das oportunidades futuras do sistema, e comumente se utiliza um horizonte de 30 anos. O aumento da população resulta diretamente no crescimento da geração de resíduos sólidos urbanos, uma vez que o consumo de produtos se eleva proporcionalmente.

Para obtenção do dado populacional futuro, foi aplicado o método gráfico de projeção populacional, conforme dados dos censos do IBGE de 2000, 2010 e 2022, e das estimativas para 2025. Com a plotagem desses valores, obteve-se o gráfico e linha de tendência, sendo possível obter a equação da reta. Realizando os cálculos através do software Excel com a equação encontrada, se obteve o valor de população para 2055, de 52.749 habitantes.

Proposta de Logística Reversa

A logística reversa e a definição dos agentes responsáveis foi estruturado a partir da avaliação de Postos de Entrega Voluntária (PEVs) em locais estratégicos da cidade, até a valorização do resíduo coletado por meio da saponificação. A proposta também se propõe a definir: 1) Comunidade geradora, atuante e beneficiada; 2) Centro de Capacitação e retirada dos produtos de limpeza; 3) Pontos de Entrega Voluntária do OVR; 4) Espaço de transformação do OVR em produtos de limpeza e 5) Coleta e transporte do OVR, no município.

Resultados e discussão

Estimativa de geração de óleo residual

Para realização da estimativa atual de geração total do município, foi considerada a população da cidade para 2025, segundo estimativa do IBGE, que totaliza o valor de 44.431 pessoas (IBGE, 2025). Assim, aplicando as relações da Figura 2, segundo metodologia de Madalozo (2008), para a área de estudo do Município de Santo Antônio da Patrulha:

- Consumo médio ponderado de óleo vegetal (C_{OV}): C_{OV} = 0,937 L/pessoa x 44431 pessoas = 41.631,8 L/mês
- Geração ponderada de óleo vegetal residual (G_{OVR}): G_{OVR} = 0,177 L/pessoa x 44431 pessoas = 7.864,3 L/mês

A partir da compilação de dados de densidade demográfica e área dos setores censitários urbanos centrais de SAP - RS (totalizando 59), calculou-se a população no software Excel, e com esse dado, calculou-se o óleo vegetal estimado, em litros por mês, com a fórmula de Madalozo (2008). Na Tabela 1, pode-se observar essas informações, para cada setor censitário.

Setores Censitários Urbanos Centrais	Área (km²)	Densidade Demográfica (hab/km²)	População IBGE 2022 (hab)	OVR Estimado (L/mês)
431760805000001	0.138502564	2425.947861	336	59.472
431760805000002	0.065004905	1307.593629	85	15.045
431760805000003	0.344746841	1064.549277	367	64.959
431760805000004	0.018571245	1507.707175	28	4.956
431760805000005	0.291996953	1154.121632	337	59.649
431760805000006	0.26929027	1262.578107	340	60,18
431760805000007	0.100962687	1436.174135	145	25.665
431760805000009	0.214492912	1958.106659	420	74,34
431760805000010	0.167604209	2326.910543	390	69,03

431760805000012	0.055005559	2381.57745	131	23.187
431760805000013	0.112481913	3573.907922	402	71.154
431760805000014	0.131330227	1599.02259	210	37.17
431760805000015	0.260612174	4201.645629	1095	193.815
431760805000017	0.141917636	2564.86797	364	64.428
431760805000018	0.260854331	3051.511536	796	140.892
431760805000019	0.284889266	2285.098377	651	115.227
431760805000020	0.140207148	2132.558895	299	52.923
431760805000021	0.44299805	1214.452298	538	95.226
431760805000022	0.13016658	1574.905019	205	36.285
431760805000023	0.45905095	1766.688426	811	143.547
431760805000025	0.0354423	4401.52023	156	27.612
431760805000026	0.147169222	4865.147685	716	126.732
431760805000027	1.270729951	442.2654864	562	99.474
431760805000028	0.324960609	2480.300619	806	142.662
431760805000029	0.365161419	624.3814057	228	40.356
431760805000030	0.100616112	1689.590239	170	30.09
431760805000031	0.42425057	2229.814327	946	167.442
431760805000032	1.489781112	512.1557751	763	135.051
431760805000034	0.765170998	359.3967893	275	48.675
431760805000039	1.057050997	1026.440544	1085	192.045
431760805000040	0.844186046	357.7410472	302	53.454
431760805000049	0.079690274	2572.459464	205	36.285
431760805000050	0.04020315	2910.219753	117	20.709
431760805000059	3.808710857	222.910069	849	150.273
431760805000061	0.13157651	1459.227026	192	33.984
431760805000062	0.207894599	2804.305653	583	103.191
431760805000063	0.244484839	2981.779992	729	129.033
431760805000064	0.125777615	2504.420203	315	55.755
431760805000065	0.048514363	10800.92507	524	92.748
431760805000066	0.112027635	6587.660243	738	130.626
431760805000067	0.355151771	1514.845324	538	95.226
431760805000084	0.079805986	4611.182907	368	65.136
431760805000085	0.077648332	3953.723062	307	54.339
431760805000086	0.091844404	4148.320254	381	67.437
431760805000087	0.096170508	4169.677479	401	70.977
431760805000088	2.59073986	324.6176943	841	148.857
431760805000090	0.322248475	294.8035677	95	16.815
431760805000092	0.205999838	936.8939394	193	34.161
431760805000093	0.577342662	1515.564426	875	154.875
431760805000094	0.006592997	8493.861118	56	9.912
431760805000095	0.144197793	3869.684741	558	98.766
431760805000097	0.187356991	2674.039534	501	88.677
431760805000098	0.030313372	4948.31133	150	26.55
431760805000099	0.024519786	3915.205505	96	16.992
431760805000100	0.530787208	591.5741657	314	55.578
431760805000104	0.05460309	5567.450477	304	53.808
431760805000105	0.029564283	7339.937795	217	38.409
431760805000108	0.643227191	1128.683629	726	128.502
431760816000003	0.56107227	242.4038359	136	24.072
Soma	22.263.247,37 km²		25.268 hab	4.472,436 L/mês

Tabela 01
Fonte: Elaborado a partir de dados do IBGE, 2022.

Processando os dados de geração de OVR de cada setor censitário da área selecionada, disponíveis na tabela 1, no QGIS, obteve-se o mapa da Figura 3. No mapa citado, foram separadas as quantidades de geração em diferentes classes de intensidades, conforme realizado por Madalozo (2008). As cores selecionadas foram para facilitar a visualização, que permite observar os setores com maior geração.

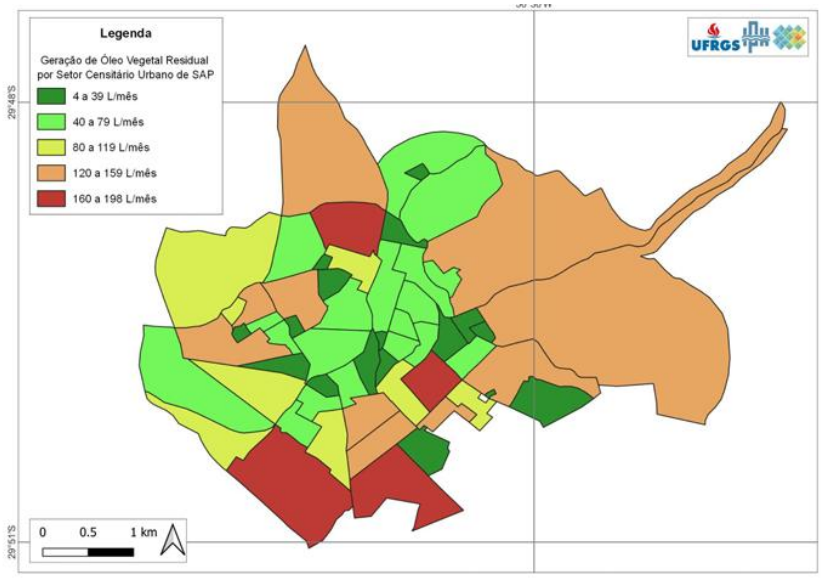


Figura 3 - Estimativa de geração de OVR, em litros por mês, por setor censitário da zona urbana central de SAP- RS. Fonte: Autora, 2025.

Projeção para 30 anos

Aplicando a projeção populacional calculada, segundo metodologia de Madalozo (2008), para a área total do Município de Santo Antônio da Patrulha:

- Consumo médio ponderado de óleo vegetal (C_{OV}): C_{OV} = 0,937 L/pessoa x 52.749 pessoas = 49.425,6 L/mês
- Geração ponderada de óleo vegetal residual (G_{OVR}): G_{OVR} = 0,177 L/pessoa x 52.749 pessoas = 9.336,5 L/mês

Com o resultado obtido, observa-se que pela previsão terá um aumento de mais de 1700 L por mês de óleo vegetal residual, ou seja, aumentará em torno de 23% em relação ao ano de 2022, no ano de 2055.

Comunidade geradora, atuante e beneficiada

A comunidade da área envolvida na logística reversa pode ser definida como: geradora, já que é a produtora do OVR a ser reciclado e sua participação é essencial para o funcionamento; atuante, já que pessoas da própria população irão atuar nas etapas de fabricação dos produtos de limpeza, através da parceria com a cooperativa local, gerando empregos e renda; e beneficiada, já que irá receber o retorno de sua contribuição através da obtenção de produtos de limpeza, ou remuneração pelos seus serviços.

A comunidade envolvida é a residente em SAP - RS, e principalmente na área urbana central do município, conforme delimitação nos tópicos anteriores. O resíduo foco da circularidade é o originado em domicílios, não considerando a geração de OVR em restaurantes e indústrias alimentícias, já que essas empresas precisam fazer a destinação ambientalmente adequada obrigatória por lei, podendo levar multas em caso de inconformidade. A quantidade de geração dessa população também foi estimada anteriormente.

Centro de Capacitação e retirada dos produtos de limpeza

Para o programa de logística reversa funcionar, a conscientização da população é essencial. A mudança de paradigma requer o entendimento da população sobre a importância da destinação correta dos resíduos, nesse caso do OVR, para preservação ambiental local. Por isso, a aplicação da logística reversa deve ser seguida de uma campanha forte da prefeitura municipal e órgãos responsáveis, com materiais explicativos de como deve ser a procedência e pontos de entrega voluntária.

O material deve ser constantemente atualizado e a campanha deve ser efetiva, como através de carros de som, banners, propagandas em jornais locais e vídeos educativos, para atingir a maior quantidade de camadas da comunidade, de diversas faixas etárias e condições financeiras. Esse material precisa conter informações como: para realizar a destinação, deve ser colocado o óleo usado gerado na residência em garrafas PET, após deixá-lo esfriar, nunca deve ser colocado o OVR em garrafas de vidro. As informações precisam ser de fácil compreensão e principalmente associadas a figuras ilustrativas, como a Figura 22, que exemplifica com figuras o procedimento de envasamento de OVR que deve ser seguido pela população.

Para o fomento de cadeias produtivas de valorização dos resíduos, é prevista a implantação de um Centro de Capacitação e Reaproveitamento de Resíduos, no qual serão realizadas oficinas com periodicidade trimestral relacionadas à temática dos resíduos sólidos. Nesse espaço, que ficará localizado no Ginásio Municipal Caetano Tedesco (endereço R. Bolívia, 71 - Pitangueiras, Santo Antônio da Patrulha - RS, 95500-000), onde poderão ser realizadas palestras de educação ambiental e oficinas de saponificação, servindo ao programa de logística reversa do OVR como ferramenta de conscientização e impacto da população.

No espaço mencionado, também indica-se que será o local para distribuição dos produtos de limpeza gerados com o OVR. A população, ao entregar OVR nesse local, sendo também um ponto de entrega voluntária, ou apresentar comprovante de baixa renda, poderá retirar os produtos desejados. Desta forma, é incentivado o funcionamento da logística. O Sistema do

Cadastro Único é um instrumento de identificação utilizado como base para seleção de diversos programas sociais destinados às famílias de baixa renda, então as pessoas poderão apresentar essa carteirinha, para comprovação.

Pontos de Entrega Voluntária do OVR

No sistema de reciclagem do óleo residual doméstico atual, do município de SAP, indica a existência de apenas um ponto de entrega voluntário (PEV), localizado na Secretaria Municipal da Agricultura e Meio Ambiente (SEMAN). Essa limitação dificulta a reciclagem, pois além de ser um único ponto, ainda não é um local comumente de grande fluxo de pessoas.

Assim, através de pesquisa de locais com maior fluxo de pessoas e análise espacial, de modo a abranger a área urbana estabelecida, foram propostos mais 26 PEVs para o município, incluindo escolas, associações, institutos, universidades, mercados e órgãos públicos. A definição dos pontos foi realizada com a plataforma do Google Earth, que permite a visualização geoespacial, geração de camada e download no formato KML. O processamento da camada de pontos se deu com auxílio do software QGIS. A localização espacial dos PEVs pode ser observada na Figura 4a. Em amarelo são os pontos propostos, enquanto em verde é o ponto já existente, que foi somado na malha.

Para avaliação da abrangência dos PEVs na área urbana em questão, foi criado um buffer de 500 m com o software QGIS, em relação a cada um, conforme observado na Figura 4b. A distância de 500 m foi definida para garantir maior conforto no deslocamento a pé, seguindo a metodologia apontada por Fiatkoski, Silva e Maceno (2020), que definiram como "adequada para que um indivíduo caminhe até um ponto de coleta de óleo de cozinha mais próximo". Os(as) autores(as) citaram Souza (2016), que em seu estudo estabeleceu como 500 m uma distância viável para uma pessoa caminhar até um ponto de ônibus, saindo de sua casa. Assim, a distância foi definida considerando deslocamentos a pé, buscando atingir a maior quantidade de pessoas possível, já que nem todas famílias possuem veículos automotivos.

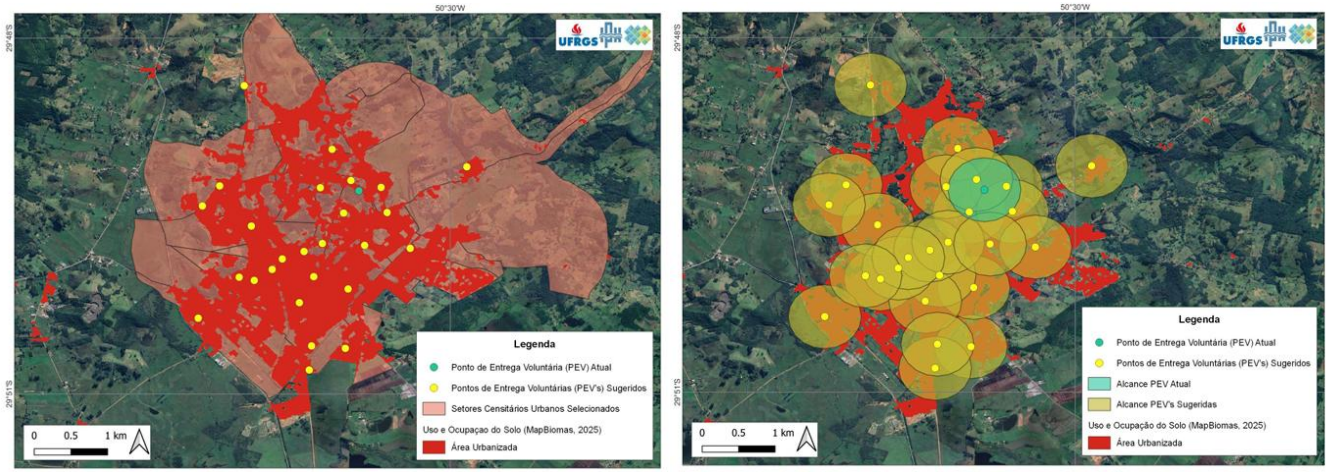


Figura 4: (a) Localização espacial dos PEVs propostos e (b) Localização espacial dos PEVs propostos.
Fonte: Autora, 2025.

Analisando a Figura 4b, é possível observar a diferença de alcance da situação atual e da sugerida, em que existe um aumento considerável, cobrindo quase toda área urbana foco do estudo. Essas áreas "sem cobertura" acabam sendo incluídas pelos pontos nas PEVs próximas, já que a movimentação média das pessoas na cidade ultrapassa 500 m, e esse valor foi definido apenas como parâmetro, em uma perspectiva de maior conforto no deslocamento a pé.

Espaço de transformação do OVR em produtos de limpeza

Na proposta dessa logística reversa, sugere-se que o local de transformação do OVR em produtos de limpeza seja em pavimento próximo ao local da nova Central de Triagem e Transbordo de Resíduos Sólidos Urbanos, através da criação de um pavilhão de saponificação, para prestação de uma cooperativa. A proximidade dos dois empreendimentos se daria em função da valoração posterior de outros resíduos.

Coleta e transporte do OVR

Para coleta e transporte do OVR, sugere-se que fique a encargo da administração pública da cidade, utilizando dos recursos obtidos pela circularidade dos produtos, além de encaminhamentos públicos, obtidos pelas leis de incentivo à reciclagem e economia reversa de resíduos municipais, como o Programa de Incentivo a Reciclagem do SINIR, o Fundo de Apoio para Ações Voltadas à Reciclagem (Favorecicle) e o Fundo de Investimentos para Projetos de Reciclagem (ProRecicle), estabelecidos pela Lei nº 14.260/2021, do Congresso Nacional (BRASIL, 2021).

Comentários finais

O trabalho propôs-se um modelo de logística reversa, definindo os agentes responsáveis. O modelo apresentado valora o OVR através da fabricação de produtos de limpeza, via saponificação, possibilitando uma solução socioambiental para a reciclagem desse resíduo no município.

Com relação à estimativa de geração de OVR, a aplicação de metodologia da literatura em conjunto com dados populacionais (IBGE, 2025), estimou-se uma geração atual de 7.864,3 L/mês para a população total do município. A espacialização dessa geração por setor censitário (IBGE, 2022), realizada com o QGIS, permitiu o entendimento da distribuição do resíduo, fator crucial para o dimensionamento e posicionamento estratégico dos pontos de coleta.

Como perspectiva para trabalhos futuros, recomenda-se a elaboração de um projeto piloto para validação da eficiência logística e operacional da rede de PEVs, bem como a instrução e busca por mais incentivos, a serem destinados para a cooperativa local, para operacionalização da etapa de saponificação, garantindo a sustentabilidade social e o pleno funcionamento do sistema proposto a longo prazo.

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE - ABREMA. Produção de resíduos cresce em 2024. 2025. Disponível em: https://www.abrema.org.br/2025/12/09/producao-de-residuos-cresce-em-2024-destin acao-adequada-melhora/. Acesso em: 10 dez. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 16 de nov. 2025.

BRASIL. Lei nº 14.260, de 8 de dezembro de 2021. Estabelece incentivos à indústria da reciclagem; e cria o Fundo de Apoio para Ações Voltadas à Reciclagem (Favorecicle) e Fundos de Investimentos para Projetos de Reciclagem (ProRecicle). 08 dez. 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14260.htm. Acesso em: 25 de nov. 2025.

FIATKOSKI, M. V.; SILVA, J. de O. S. da; MACENO, M. M. C. Proposta de sistema de logística reversa de óleo de cozinha residual em centro urbano: estudo de caso em um bairro no município de Curitiba – PR. Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Ponta Grossa, 2020. Disponível em: https://aprepro.org.br/conbrepro/2020/anais/arquivos/10082020_201000_5f7fa69885 8f2.pdf. Acesso em: 15 de out. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Demográfico 2010: resultados. Disponível em: https://censo2010.ibge.gov.br/pt/resultados. Acesso em: 12 de jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Malha de Setores Censitários – bases de dados geoespaciais. 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html?caminho=organiza cao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_de_setores_censitarios__divisoes_intra municipais/censo_2022/setores/shp/UF. Acesso em: 15 de nov. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Setor Censitário: Quadro Geográfico de Referência para Produção, Análise e Disseminação de Estatísticas. Série: Malha Territorial, nº 32. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/quadrogeografico/pdf/32_Setor%20Censitario.pdf. Acesso em: 17 de nov. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Setor Censitário: Quadro Geográfico de Referência para Produção, Análise e Disseminação de Estatísticas. Série: Malha Territorial, nº 32. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/quadrogeografico/pdf/32_Setor%20Censitario.pdf. Acesso em: 17 de nov. 2025.

KEYASSOCIADOS. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Santo Antônio da Patrulha. ProSinos - Consórcio Público de Saneamento Básico da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos. SAP - RS, 2012. Disponível em: http://antigo.santoantoniodapatrulha.rs.gov.br/pmsap/pages/download/5f21c3c87f67f. pdf. Acesso em: 04 de out. 2025.

MADALOZO, J. A. O Potencial do uso de rejeito de Óleo Vegetal na Produção de Biodiesel em Ponta Grossa – PR. 2008. Dissertação (Mestrado em Geografia – Gestão do Território), Universidade Estadual de Ponta Grossa, PR, 2008.

MOTA, V. T. et. al. Óleo de cozinha: problemática do descarte inadequado e soluções para o seu gerenciamento. Cadernos Técnicos Eng. Sanit. Ambient., v. 3, n. 4, p. 53-68, 2023. Disponível em: https://abes-dn.org.br/wp-content/uploads/2025/01/RESA_NTv3n4_53-68.pdf. Acesso em: 10 de nov. 2025.

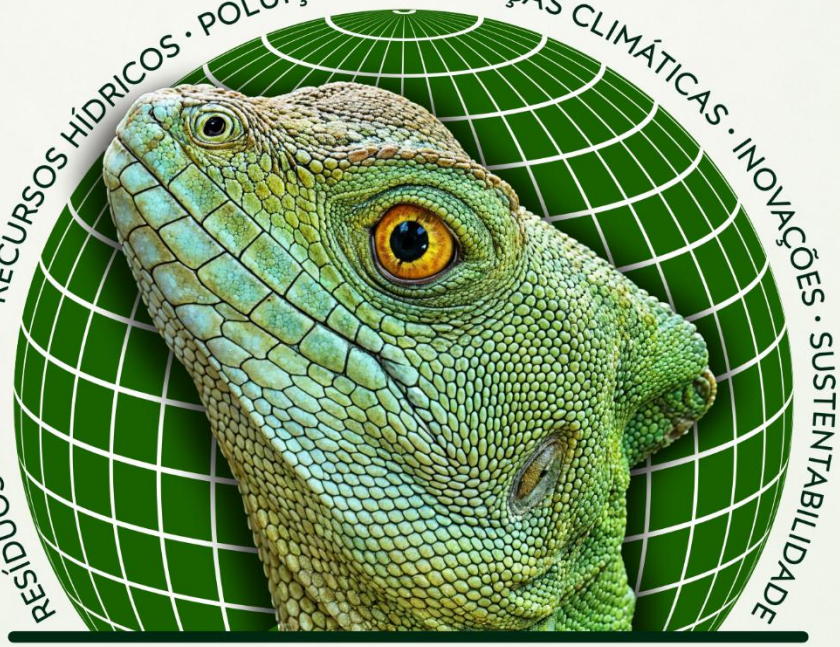
ROCHA, A. do A. 2021. Brasil joga cerca de 1 bilhão de litros de óleo de cozinha no ralo a cada ano. Jornal O Estado de S. Paulo. Disponível em: https://www.estadao.com.br/economia/coluna-do-broad/brasil-joga-cerca-de-1-bilhao-de-litros-de-oleo-de-cozinha-no-ralo-a-cada-ano/?utm_source=facebook:newsfeed. Acesso em: 23 de nov. 2025.

SIMAN, R. R.; YAMANE, L. H.; DUTRA, R. M. de S. Gestão integrada de resíduos sólidos: práticas e desafios. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, ES. 2023. Disponível em: https://repositorio.ufes.br/server/api/core/bitstreams/bfde99de-a6ad-4283-9878-add6 b356ca0c/content. Acesso em: 13 de nov. 2025.

SOUZA, P. K. S. Análise da qualidade do sistema de transporte público por ônibus em Natal/RN sob a ótica dos estudantes do CT – UFRN Campus central. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Belém, Rio Grande do Norte. Acesso em: 24 de out. 2025.

ÁREA TEMÁTICA 18

MEIO AMBIENTE, POLÍTICAS PÚBLICAS, LEGISLAÇÃO E LICENCIAMENTO AMBIENTAL



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

BRAZIL'S REGULATORY FRAMEWORK FOR BIODIESEL AND BIOMETHANE IN LONG-HAUL FREIGHT TRUCKING: ADVANCES, GAPS, AND BARRIERS

1 Álvaro Augusto Ciuffo, 2 Marcelo Xavier Seeling
1 Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, e-mail: aciuffo@aluno.puc-rio.br; 2 Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, e-mail: seeling@puc-rio.br

Keywords: Biodiesel; Biomethane; Long-haul freight trucking

Abstract

This article offers an assessment of Brazil's regulatory framework that promotes the use of biodiesel and biomethane in long-haul freight trucking, mapping advances, gaps, institutional challenges, and adoption barriers. The study uses a qualitative approach based on document analysis of laws, decrees, resolutions, programs, and technical standards, complemented by sector literature. Results are organized into five blocks: (i) legal and regulatory foundations; (ii) economic and financial effectiveness; (iii) institutional capacity and multi-level governance; (iv) technologies suited to long-haul freight trucking; and (v) empirical evidence and industry practices that influence adoption in heavy-duty fleets. The discussion is limited to presenting and evaluating the findings, without proposing new measures. We conclude that Brazil's framework is extensive and evolving, but inconsistencies in how the rules fit together remain, there is limited focus on the long-haul segment, and economic and operational uncertainties still limit scale and predictability. The study provides an empirical and analytical basis for follow-on assessments.

Introduction

Road transport handles most of Brazil's freight and remains highly dependent on diesel, which makes its emissions and energy costs critical issues for the energy transition in heavy long-haul freight trucking, often called over-the-road (OTR) trucking (SOUZA; BRAND, 2022). The road mode accounts for about 70% of Brazil's freight matrix (measured in TKU -ton-kilometer), and road transport was responsible for a little over 90% of the transport sector's emissions in 2023; at the national level, transport represented around 11% of the country's gross emissions in a well-to-wheel view (which measures carbon intensity from production/supply through use in the vehicle) (CEBDS, 2025). Transport is one of the largest emitters of greenhouse gases (GHG) and, at the same time, one of the hardest sectors to decarbonize due to its reliance on fossil fuels (STOPPE, 2024).

The Fuels of the Future Program (*Combustível do Futuro*) grew out of a technical process coordinated by the Fuels of the Future Technical Committee (CT-CF), created by the National Council for Energy Policy (*Conselho Nacional de Política Energética, CNPE*) in 2021, with participation from multiple ministries and regulatory agencies (EPE, 2025b). The law consolidates the ambition to promote low-carbon sustainable mobility by building on national experience with ethanol (a renewable alcohol-based biofuel mainly produced from sugarcane and corn), biodiesel (a biofuel produced from vegetable oils and animal fats), and the National Biofuels Policy (*Política Nacional de Biocombustíveis, RenovaBio*). It links RenovaBio, the Green Mobility and Innovation Program (Mover), and the Brazilian Vehicle Labeling Program (PBE Veicular) to reduce emissions at the best cost-benefit ratio. Life-cycle assessment (LCA) shifts from a "well-to-wheel" approach through 2031 to "cradle-to-grave" starting in 2032, covering input production, manufacturing, distribution, use, and end-of-life/recycling, thereby expanding emissions accounting across the entire chain (EPE, 2025b; IEMA, 2025; ABIOVE, 2025).

From a technology standpoint, biofuels (bio-based fuels that can replace fossil fuels) can support decarbonization, given the country's track record with feedstocks such as sugarcane, corn, and soy (IEMA, 2025). Using biodiesel in trucks can cut carbon dioxide (CO_2) emissions by up to 77% compared with petroleum diesel (SCANIA, 2024), while biomethane (a renewable gas obtained by purifying biogas) appears as an option for heavy road transport, with a production chain already established and applicable at different scales (CNT, 2022; SILVA; GODOY JR., 2023). Expansion should be evaluated carefully to avoid opening new cultivation areas in natural territories, with priority given to converting degraded pastureland (IEMA, 2025).

This study examines the advances, gaps, and barriers in Brazil's regulatory framework for biodiesel and biomethane in OTR trucking, in light of the recent context of Fuels of the Future and RenovaBio. The results are organized into legal and regulatory foundations, economic-financial effectiveness, institutional capacity/governance, and technologies suited to long-haul trucking, along with empirical evidence and industry practices.

Materials and Methods

The study uses a qualitative, descriptive–evaluative approach. The documentary corpus includes federal laws, decrees, and resolutions; regulatory acts; and sectoral technical reference documents, along with occasional institutional materials when explicitly cited as descriptive evidence. A juridical–structural perspective guides a combined reading of legal texts and the institutional structures that condition their application, consistent with principles-based legal interpretation (ALEXY, 2024; CANOTILHO, 2003) and with public policy analysis focused on instruments and implementation arrangements (HOWLETT; RAMESH; PERL, 2020; DESCLAUX; PINTO JR., 2021).

Data were handled following Content Analysis guidelines, adapted to the legal-institutional context, in four steps: (1) collection and organization of the documentary and empirical corpus; (2) thematic coding (units of meaning, keywords, and core concepts); (3) analytical categorization (grouping into five main blocks); and (4) interpretive synthesis (integrating findings into thematic blocks that structure the results section) (BARDIN, 2015; FLICK, 2022).

The findings are organized into five thematic areas: (i) legal and regulatory foundations; (ii) economic–financial effectiveness; (iii) institutional capacity and multi-level governance; (iv) technologies suited to OTR trucking; and (v) empirical evidence and industry practices.

The time frame covers publications and acts up to 2025. As limitations, we note the frequent updates to sector metrics, the absence of proprietary economic microdata, and the careful use of institutional materials only as descriptive corroboration. These constraints do not compromise the consistency of the assessment, which is anchored primarily in official sources and technical studies.

Regulatory Context

Law No. 9,478/1997 marks the start of Brazil's modern energy-governance framework by establishing the National Energy Policy (*Política Energética Nacional*) and creating the National Council for Energy Policy (CNPE), responsible for strategic guidelines, and the then-named National Agency of Petroleum (*Agência Nacional do Petróleo, ANP*), tasked with regulating, authorizing, and overseeing sector activities (BRASIL, 1997). The statute sets objectives that combine supply security, economic efficiency, and environmental protection, and it organizes the concessions and bidding regime that gives legal predictability to the expansion of energy infrastructure (BRASIL, 1997). Although primarily focused on oil and natural gas, the law serves as the institutional frame upon which, in subsequent years, specific low-carbon fuel policies and related sector rules are built, forming the throughline of this regulatory context (BRASIL, 1997).

In 2004, two legal acts shaped planning and contracting in the energy sector. Law No. 10,847/2004 authorizes the creation of the Energy Research Office (*Empresa de Pesquisa Energética, EPE*), linked to the Ministry of Mines and Energy (*Ministério de Minas e Energia, MME*), to provide studies and research for sector planning across electricity, oil, natural gas, and other sources; among its responsibilities are studies for expansion plans and long-term scenarios (BRASIL, 2004a). Complementing this, Law No. 10,848/2004 regulates electricity commercialization, establishing the Regulated Contracting Environment (*Ambiente de Contratação Regulada, ACR*) and the Free Contracting Environment (*Ambiente de Contratação Livre, ACL*) and defining contracting rules for these markets with their own competitive procedures (BRASIL, 2004b). Together, these acts consolidate the public planning function and the contracting regime for the sector, providing an institutional scaffold for subsequent policies and programs (BRASIL, 2004a; BRASIL, 2004b).

The recent trajectory of the National Fund for Scientific and Technological Development (*Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, FNDCT*) begins with Law No. 11,540/2007, which establishes the fund, defines its purposes, funding sources, and governance, and positions it as a federal financing instrument for science, technology, and innovation applicable to energy and renewable fuels (BRASIL, 2007). Decree No. 6,938/2009 then regulates the FNDCT and its governance (BRASIL, 2009a). A turning point comes with Complementary Law No. 177/2021, which secures the fund's budget execution and prohibits budget freezes (BRASIL, 2021a). In 2022, Provisional Measure No. 1,136 sought to limit the use of fund surpluses but was not converted into law, keeping the regime instituted by LC 177 in place (BRASIL, 2022a). The improvement cycle continues with Law No. 14,554/2023, which strengthens planning, transparency, and social oversight by amending Law No. 11,540/2007 (BRASIL, 2023a). Finally, Law No. 15,184/2025 makes additional adjustments to governance and execution, including on the use of surpluses and repayable financing (BRASIL, 2025a).

The National Policy on Climate Change (*Política Nacional sobre Mudança do Clima, PNMC*) sets the programmatic legal framework for decarbonization in Brazil by defining objectives, principles, and instruments for mitigation and adaptation, and by providing institutional arrangements for cross-sector coordination, including energy and transport, while authorizing economic instruments to incentivize emissions reductions (BRASIL, 2009b). Decree No. 11,075/2022 establishes the normative structure of the Brazilian Emissions Reduction Market (*Mercado Brasileiro de Redução de Emissões, MBRE*), mandates the preparation of sectoral mitigation plans by competent ministries, and creates the National System for the Registration of Emissions and Offsets (*Sistema Nacional de Registro de Emissões e Compensações, SINARE*) to ensure traceability and accounting with a view to market interoperability (BRASIL, 2022b). For OTR trucking, the PNMC and its related decree act as an enabling framework for coordination with sector programs, such as drop-in biofuels, understood as functional equivalents to fossil fuels (CNT, 2024), and for price signals via emissions pricing, increasing predictability and coherence between national climate targets and regulatory instruments applied to the heavy OTR segment (BRASIL, 2009b; BRASIL, 2022b).

The National Policy on Solid Waste (*Política Nacional de Resíduos Sólidos, PNRS*) consolidates a circular-economy approach by setting principles, shared responsibilities, and instruments that prioritize prevention, reduction, reuse, recycling, and, where applicable, energy recovery/valorization of waste, including anaerobic digestion (BRASIL, 2010). Its recent regulation details planning at state, regional, and municipal levels, includes a specific chapter on energy recovery, and sets technical criteria for recovery facilities, aligning with climate and energy policies (BRASIL, 2022c). Within this framework, biogas from waste is recognized as an energy-recovery route under the PNRS and its Decree, while biomethane, the purified product of biogas, has quality specifications set by ANP: Resolution No. 886/2022 sets standards for biomethane from landfills and wastewater treatment plants for vehicle use, and Resolution No. 906/2022 sets specifications and quality-control procedures for biomethane produced from other feedstocks, enabling its use as a fuel in road freight transport (ANP, 2022d; 2022e).

Following the PNRS, the Forest Code (*Código Florestal*) provides the legal-environmental basis for rural land use by protecting native vegetation, defining Permanent Preservation Areas (*Áreas de Preservação Permanente, APP*) and Legal Reserves (*Reserva Legal*), and instituting the Rural Environmental Registry (*Cadastro Ambiental Rural, CAR*) as a mandatory electronic registry for rural properties and holdings (BRASIL, 2012a). Subsequent regulations created operational tools for traceability and regularization: Decree No. 7,830/2012 governs the CAR and establishes the Environmental Regularization Program (*Programa de Regularização Ambiental, PRA*), while Decree No. 8,235/2014 details procedures and implementation timelines for the PRA by subnational governments (BRASIL, 2012b; BRASIL, 2014). More recently, Decree No. 11,015/2022 updates CAR and PRA rules, reinforcing registry integration and electronic monitoring for environmental control (BRASIL, 2022h). This set of norms provides the territorial and environmental compliance framework under which agro-energy supply chains operate, combining conservation criteria with registries and regularization mechanisms open to public verification (BRASIL, 2012a; 2012b; BRASIL, 2014; BRASIL, 2022).

Established by Law No. 13,576/2017, the National Biofuels Policy (RenovaBio) sets compulsory annual decarbonization targets for fuel commercialization, creates Decarbonization Credits (CBIOs), and provides for certification of efficient production with accredited inspection firms (BRASIL, 2017). Implementation is detailed by Decree No. 9,308/2018 (targets for distributors) and Decree No. 9,365/2018 (certification and inspection firms), as well as Decree No. 9,888/2019, which creates the governance of the RenovaBio Committee and monitoring procedures; subsequently, Decrees No. 9,964/2019 and 10,102/2019 refine reporting and oversight routines (BRASIL, 2018a; 2018b; 2019a; 2019b; 2019c). Operational rules were updated by Decree No. 11,141/2022 (technical parameters and calculation methodology) and Decree No. 11,499/2023 (governance and procedures), while Law No. 13,986/2020 introduced Article 15-A on guarantees backing CBIOs and Law No. 14,592/2023 adjusted commercialization and transparency provisions (BRASIL, 2020; 2022f; 2023b; 2023d). More recently, Law No. 15,082/2024 amended the policy's scope, and Decree No. 12,437/2025 consolidated and updated subsequent rules, preserving the targets–certification–credits architecture that structures RenovaBio (BRASIL, 2024a; 2025b).

Law No. 14,134/2021 organizes the natural gas sector, ensuring non-discriminatory access to infrastructure, establishing authorization-based grants and commercialization, and conditioning gas movement on compliance with ANP specifications; it also grants equivalent treatment to other gases that meet those specifications, providing the legal basis for biomethane's inclusion (§ 2 of Art. 3 and Art. 8) (BRASIL, 2021b). Decree No. 10,712/2021 regulates pipeline transport and access to the transmission network, which moves gas from production points and Natural Gas Processing Units (*Unidades de Processamento de Gás Natural, UPGNs*) and interconnects regions and markets under federal jurisdiction, distinguishing them from distribution networks regulated by the states (BRASIL, 2021c). Decree No. 12,153/2024 updates this regulation with procedural and governance adjustments (BRASIL, 2024b). Together with ANP Resolutions No. 886/2022 and No. 906/2022, which set biomethane standards and quality control, this framework allows injection and commercialization of the product whenever ANP technical requirements are met (BRASIL, 2022d; 2022e).

The Zero Methane Program *(Programa Metano Zero*), led by the Ministry of the Environment (*Ministério do Meio Ambiente, MMA*), sets a federal agenda to reduce methane emissions by using the energy potential of urban and agro-industrial organic waste, focusing on biogas and biomethane (BRASIL, 2022g). The program design prioritizes financing, technology promotion, and cross-sector integration (waste, sanitation, agriculture, energy, and transport), coordinated with the PNRS and its regulation (BRASIL, 2022g).

The Brazilian Emissions Trading System (*Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa, SBCE*) is established by Decree No. 11,550/2023, which sets the bases for monitoring, reporting, and verification (MRV) of emissions and defines how trading units are organized nationwide (BRASIL, 2023c). In complement, Law No. 15,042/2024 governs the *MBRE*, consolidates rules for registering and trading credits and allowances, and sets interministerial coordination, integrating it with the climate policy under the PNMC (BRASIL, 2024c). At the sector level, this framework provides the legal-institutional basis for regulated carbon pricing and alignment with existing fuel-sector instruments, while preserving the specific targets-and-certification architecture for biofuels (BRASIL, 2023c; 2024c).

Law No. 14,993/2024 establishes the Fuels of the Future Program (*Combustível do Futuro*) and sets guidelines and instruments to promote sustainable fuels in transport, with a focus on reducing greenhouse-gas emissions, improving energy efficiency, and using life-cycle assessment (LCA) (BRASIL, 2024d). The law defines objectives, principles, and administrative responsibilities; authorizes gradual targets for certain sustainable fuels; creates certification and environmental-performance labeling; and integrates the policy with existing arrangements such as the PNMC and RenovaBio, providing a legal basis for coordinated action by the MME, ANP, and other sectoral bodies (BRASIL, 2024d).

Established by Decree No. 12,044/2024, the National Bioeconomy Strategy (*Estratégia Nacional de Bioeconomia, E2B*) lays out state-level, cross-cutting guidelines and instruments to expand the sustainable use of biological resources, connect science, innovation, and industrial policy, and integrate bioeconomy, energy transition, and circular economy (BRASIL, 2024). The decree defines lines of action, governance and monitoring mechanisms, and guides financing, capacity-building, infrastructure, and value chains, with emphasis on biofuels, biogas/biomethane, and waste valorization as part of a national low-carbon agenda (BRASIL, 2024f).

The National Circular Economy Strategy (*Estratégia Nacional de Economia Circular, ENEC*), established by Decree No. 12,082/2024, sets guidelines and instruments for transitioning to circular production models, focusing on efficient resource use, waste reduction, and integration with environmental and industrial policies (BRASIL, 2024e). The decree creates interministerial coordination bodies and mandates action plans and monitoring mechanisms, aligning with the PNRS and the

decarbonization agenda (BRASIL, 2024e). For this article's scope, the ENEC reinforces waste valorization as an energy input, including for biogas and biomethane, and provides a strategic umbrella that connects circular economy, industrial policy, and the energy transition applicable to the heavy OTR segment (BRASIL, 2024e).

Decree No. 12,614/2025 regulates Law No. 14,993/2024 (Fuels of the Future) by detailing procedures, responsibilities, and implementation instruments, including LCA-based environmental performance labeling, the organization of gradual targets for sustainable fuels, and certification and traceability rules such as the Biomethane Guarantee of Origin Certificate (*Certificado de Garantia de Origem de Biometano, CGOB*) (BRASIL, 2025c; 2024d). The decree also sets rules for implementing sector programs provided by law, such as the National Renewable Diesel Program (*Programa Nacional de Diesel Verde, PNDV*), and defines guidelines for target-setting and compliance by the CNPE, while integrating operations with ANP technical regulation (BRASIL, 2025c).

With this decree, the recent regulatory cycle that links climate, waste, and energy to sustainable transport fuels is complete, setting the stage for the assessment, ahead, of advances, gaps, and economic barriers in this framework (BRASIL, 2025c).

Results and Discussion

The analysis below organizes the findings into five thematic areas that reflect the main conditions shaping the adoption of biodiesel and biomethane in OTR trucking. Building on the regulatory baseline summarized in Section 3 and on the document analysis and sector literature, each subsection presents evidence and assesses coherence, scope, and observed effects on predictability, costs, and implementation. The focus remains descriptive–evaluative: to show what the rules and instruments produce in terms of incentives and constraints, to make gaps and barriers explicit, and to record advances.

Legal and Regulatory Foundations

This subsection consolidates, in a descriptive way, the legal provisions directly related to biodiesel and biomethane. It also includes HVO (Hydrotreated Vegetable Oil), known in Brazil as *diesel verde* (renewable diesel), because recent regulation has begun to address it explicitly, via the PNDV and participation targets, as part of the Diesel-cycle fuel matrix. The Diesel cycle is the ideal thermodynamic cycle for compression-ignition engines, consisting of isentropic compression and expansion, heat addition at constant pressure, and heat rejection at constant volume, with potential implications for the OTR trucking segment (BRASIL, 2024d; CNT, 2024; HEYWOOD, 2018; BORGNAKKE; SONNTAG, 2020; STONE, 2017; RAKOPOULOS; GIAKOUMIS, 2009). Cross-cutting instruments refers to the set of climate, waste, and emissions-market rules (PNMC/MBRE, PNRS, E2B, SBCE) that create enabling conditions, standardization, traceability, pricing, and coordination, so sustainable fuels can scale with greater predictability in the heavy segment.

Regulation of biodiesel has moved forward significantly with the increase of the biodiesel blend mandate to B14 in 2024, and the signal for B15 in 2025, which strengthens demand for the fuel and creates a more promising investment horizon across the supply chain (EPE, 2025a). This progress is complemented by the recent amendment to Law No. 13,033/2014, which sets a ramp-up in the mandatory blend to 20% by 2030, with flexibility between 13% and 25% depending on technical feasibility, and includes traceability for Diesel-cycle fuels, ensuring tighter process control (BRASIL, 2024d). Another relevant change is the replacement of auctions with direct contracting, which altered biodiesel's market dynamics by allowing sector players to contract bilaterally, thereby improving predictability and transaction security (EPE, 2025a).

However, despite these advances, gaps remain that undermine market predictability. The trajectory of biodiesel mandates has seen back-and-forth adjustments, creating temporal uncertainty up to the final definition of B15, which directly affects supply planning and producer–distributor contracting (EPE, 2025a). This regulatory volatility represents a significant risk because it complicates expectation alignment and long-term investment decisions along the biodiesel value chain.

Regulation of biomethane has advanced by standardizing quality and traceability, but diffusion in OTR trucking still faces challenges. On the technical front, ANP Resolution No. 886/2022 standardizes the quality of biomethane from landfills and wastewater treatment plants for vehicle use, setting limits and control obligations (BRASIL, 2022d). Complementing this, ANP Resolution No. 906/2022 sets specifications and control procedures for commercialization from other production routes, completing the quality framework (BRASIL, 2022e). Institutionally, Law No. 14,993/2024 creates the CGOB, a traceability certificate backed by produced and commercialized volume, issued by an ANP-accredited agent with minimum information on feedstock origin and production location, reinforcing the credibility of the environmental attribute (BRASIL, 2024d). Even so, a sector diffusion gap remains: there are still no specific mandatory participation policies for biomethane in road transport, which limits its penetration in the segment (CNT, 2022). From an economic-signal standpoint, biomethane shows high eligibility in RenovaBio and rapid growth in authorized plants, with a relevant share of production tied to waste and 100% of eligible volume at certified units (EPE, 2025a). Finally, from a logistics angle, there are already cases with dedicated pipelines and injection projects in existing networks, including free-market contracts, indicating feasible offtake and grid connection (EPE, 2025a).

ANP Resolution No. 842/2021 classifies renewable diesel (HVO) as a paraffinic hydrocarbon and sets specifications and quality control, recognizing five technological routes for its production; commercialization is prohibited when limits are not met (CNT, 2024). Implementation gaps persist, notably the absence of an engine approval standard by manufacturers for HVO use in the country (CNT, 2024). Programmatically, Law No. 14,993/2024 establishes the PNDV, with a minimum annual volumetric participation to be set by the CNPE and capped at 3% of diesel sold, while allowing voluntary addition above this cap upon notification to ANP (BRASIL, 2024d).

At a cross-cutting level, the fuel-sector regulatory architecture is organized around two pillars: (i) national annual emissions-reduction targets for the fuel matrix, and (ii) biofuel certification with efficiency scores, linked through CBIOs (STOPPE, 2024). Governance of these targets is exercised by the CNPE, based on a technical proposal from the RenovaBio Committee and modeling that considers carbon intensity, fuel supply and demand, and the participation of biodiesel, biomethane, and ethanol, among other economic parameters (STOPPE, 2024). Operationalization occurs via Decree No. 9,888/2019, which sets biennial target cycles with tolerance bands and establishes the obligation for fuel distributors to demonstrate compliance (STOPPE, 2024).

Economic–Financial Effectiveness

This subsection presents the economic evidence that shapes adoption of biodiesel and biomethane in OTR trucking and, where relevant, renewable diesel (HVO) as a comparison point. It covers: regulatory demand signals (targets and CBIOs); economic valuation of the environmental attribute (eligibility and issuance of CBIOs); feedstock cost and supply risks; capital investment needs (CAPEX); operating and logistics costs; effects on total cost of ownership (TCO); and competitiveness versus fossil diesel, as well as scale factors and market liquidity. Findings are organized by fuel and, at the end, synthesize cross-cutting elements of prices, predictability, and instrument coordination.

Biodiesel's average eligibility in RenovaBio remains lower than other pathways due to grain traceability, suggesting a need to improve the chain of custody (EPE, 2025a). A relevant share of biodiesel volume is not eligible for CBIOs, reducing monetization of the environmental attribute and limiting economic signals for investment (EPE, 2025a). Dependence on imported methanol is a cost and supply concern for biodiesel production (EPE, 2025a). Volatility in inputs such as methanol and reliance on imports add cost risk to biodiesel production (EPE, 2025a). CBIO market predictability is conditioned by targets, prices, and litigation, which can affect producers' complementary revenue and distributors' strategy (EPE, 2025a). Using biodiesel is presented as delivering economic benefits to fleet operators while preserving quality and payload capacity, according to Scania (SCANIA, 2024). Engine compatibility with biodiesel allows economic gains without compromising vehicle performance, reliability, or durability, according to the manufacturer (SCANIA, 2024).

The biomethane value chain can generate jobs and income domestically by mobilizing local inputs and services (CNT, 2022). Low current national supply limits economies of scale and raises adoption costs for fleets (CNT, 2022). The fuels market is dominated by liquid options, which pressures biomethane's competitiveness and prices (CNT, 2022). Purification and conditioning facilities require high CAPEX, affecting cost and economic feasibility (CNT, 2022). For biomethane, expansion depends on the maturity of gas-powered vehicles and firm demand contracts, especially for trucks and heavy operations (EPE, 2025a). In 2024, RenovaBio eligibility was around 41–42% for biodiesel (average across pathways), while biomethane reached ~100% per plant and approximately 86–87% of total volume produced (EPE, 2025a). Framing biomethane within market instruments such as RenovaBio's decarbonization credits is indicated as a factor that can improve project financial viability, despite recent swings in carbon markets (SILVA; GODOY JR., 2023). Economic predictability still depends on wider diffusion of contracts and cost reductions in purification and quality-control stages, especially for small entrepreneurs (SILVA; GODOY JR., 2023).

HVO costs remain above fossil diesel and fatty-acid methyl ester biodiesel; as a reference, in California (Jan/2024) the resale price was about 2.3% above fossil diesel (CNT, 2024). In European long-haul trucking (2030; >16 t), projected TCO for HVO trucks tends to be ~3% above fossil diesel on 500–1,000 km routes, reflecting fuel-price pressure and limited regional availability (CNT, 2024). In Brazil, low domestic supply, production costs, and the need for retrofits/new hydrotreating units at refineries remain central barriers to scale (CNT, 2024). EPE notes that HVO planning should consider feedstock availability, unit capacity and location, and impacts on consumer prices and international competitiveness (EPE, 2025b).

In 2024, the average CBIO price was R$ 88.02, with variations linked to supply and judicial effects influencing the market (EPE, 2025a). RenovaBio's framework of annual targets helps mitigate regulatory risk while allowing dynamic adjustments, key for pricing and protection against price swings, also referred to as "CBIO hedging" (STOPPE, 2024). Because supply is voluntary, the CBIO price is the central economic signal; the effectiveness of this signal depends on certification costs, market liquidity, and the certificate's validity period (up to three years) (STOPPE, 2024). Monetary penalties for noncompliance create an economic floor for CBIO demand, but the need to make up the shortfall in the following cycle adds intertemporal volatility to compliance costs (STOPPE, 2024). Policies based solely on carbon pricing tend to have limited effectiveness in transport, since the sector faces high abatement costs and low motivation to cut emissions without targeted incentives and innovation measures (STOPPE, 2024). Asymmetries between CBIOs and credits/allowances in other markets hinder harmonization, fungibility, and offset uses, reducing integration with broader carbon pricing (STOPPE, 2024). Creating a CBIO+ has been discussed to add additionality and allow trading in carbon markets, increasing the asset's value and credibility (STOPPE, 2024).

Effectiveness depends on instruments that ensure scale and economic predictability, connecting regulatory targets to private investment in producing and using biofuels in long-distance freight (BERNI, 2019). Without coordination between energy policy and market instruments, expansion of biodiesel and biomethane in OTR trucking tends to face revenue uncertainty and high transition costs (BERNI, 2019). Building market and scale for alternative fuels depends on stable policies that lower transaction costs and signal predictable demand in heavy freight (BERNI, 2022). Energy use of waste (biogas/biomethane) can reduce import dependence and diesel-related costs, with positive macroeconomic and logistics effects (BERNI, 2022). Diversifying feedstocks and the possibility of integrating with the existing network reduce supply risk, but financial viability still requires consistent market instruments and financing (BERNI, 2024). Expanding the biogas chain depends on overcoming political, logistics, regulatory, financial, and market hurdles that currently limit scale and investment predictability in OTR trucking (BERNI, 2024). EPE compiles

targets and projections introduced by Law No. 14,993/2024 for different sustainable fuels, offering a predictability framework for market agents in supply planning and investment (EPE, 2025b). The gradual targets indicated for Sustainable Aviation Fuel (SAF), biomethane, and biodiesel create a regulatory demand outlook that can reduce revenue uncertainty for agents (EPE, 2025b). Setting percentages and annual targets tends to guide investment in production capacity and logistics, according to EPE's technical synthesis (EPE, 2025b).

Diesel remains the main cost input in OTR trucking, with strong sensitivity to international price and exchange-rate moves, which compress margins and create volatility for logistics operators (SOUZA; BRAND, 2022). Brazil can more than double biofuel production by 2050 to meet an ambitious scenario of a just energy transition, without pressuring food agriculture or causing new deforestation (IEMA, 2025). The high share of bioenergy in the energy and industrial mix (industrial renewability of 64.4% in 2024) suggests room for economic gains through fossil-fuel substitution and self-generation with waste (IEMA, 2025).

Institutional Capacity and Multi-Level Governance

This subsection brings together evidence on governance arrangements, regulatory capacities, and coordination across government levels and agencies that affect biodiesel and biomethane in OTR trucking, recording the roles, processes, and interfaces described in the sources.

At the level of overall governance, the National Bioeconomy Strategy (E2B), structured as a national plan under an interministerial commission, creates a setup to coordinate bioeconomy, energy, and climate policy, a necessary condition to clear implementation bottlenecks for biomethane in trucking companies (BERNI, 2024). Governance of Fuels of the Future (Combustível do Futuro) is described as interministerial, involving the Office of the Chief of Staff (*Casa Civil*); Ministry of Mines and Energy (MME); Ministry of the Environment (MMA); Ministry of Infrastructure (*Ministério da Infraestrutura, MINFRA*); Ministry of Agriculture (*Ministério da Agricultura, MAPA*); Ministry of Foreign Affairs (*Ministério das Relações Exteriores, MRE*); Ministry of Science, Technology and Innovation (*Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação, MCTI*); and regulatory agencies, reinforcing horizontal coordination (EPE, 2025b). The Fuels of the Future Technical Committee (CT-CF) makes explicit the linkages among energy, environment, industry, and transport; EPE reports ongoing participation in subcommittees and working groups, supporting the MME in drafting the bill (EPE, 2025b). Target-setting for renewable diesel and biomethane is the responsibility of the National Council for Energy Policy (CNPE), while ANP sets percentages and procedures, showing a division of responsibilities and the need for inter-institutional coordination (EPE, 2025b).

Within RenovaBio, governance combines final decisions by the CNPE with technical preparation by the RenovaBio Committee, with interministerial participation, ANP, and EPE (STOPPE, 2024). The operational cycle of CBIOs involves the MME/CNPE (targets), ANP (individual targets, oversight, and accreditation of audits), the Federal Data Processing Service (*Serviço Federal de Processamento de Dados, SERPRO*) (CBIO Platform), bookkeeping institutions, and the Brazil's stock exchange (*Brasil, Bolsa, Balcão, B3*) (registration and trading). The requirement for independent audits, accredited and subject to ANP oversight, forms a technical arrangement to ensure data integrity and efficiency scores (STOPPE, 2024). Even so, compliance by distributors remains uneven, calling for ongoing regulatory coordination (EPE, 2025a).

Regarding federal coordination and interfaces with infrastructure, as a gaseous fuel, biomethane requires dedicated distribution aligned with the existing network (CNT, 2022). Studies point to the need for coordination between federal and state levels to reduce uncertainties and expand adoption beyond a few states with specific rules; the entry of new players increases complexity and requires governance to ensure quality, safety, and transparency (SILVA; GODOY JR., 2023). EPE's clarification note (2025b) mentions connections of biomethane plants to distribution/transmission networks when economically viable and a national integrated infrastructure plan, reinforcing the role of planning. In the National Logistics Plan 2035 (*Plano Nacional de Logística 2035, PNL 2035*), road transport retains a structurally high share even with greater rail/coastal shipping supply, demanding coherence between modal targets and policies for OTR trucking (MINFRA/EPL, 2021). Dependence on the road mode and the quality/coverage of the paved network remain structural constraints on the effectiveness of decarbonization policies (SOUZA; BRAND, 2022).

For territorial planning and safeguards, recommendations include linking biofuel production goals to mitigation targets; delineating/monitoring cultivation and exclusion zones; and setting minimum productivity-per-area parameters (IEMA, 2025). They also point to a territorial strategy based on regional strengths, incentives for research and development (R&D) on new routes, and planning for conversion/adaptation of refineries to biorefining (IEMA, 2025). Even if expansion occurs on degraded pastureland, public planning and monitoring are needed to avoid competition with food/forests; food production should take priority within the 56 million hectares (Mha) estimated for agricultural conversion (IEMA, 2025). IEMA (2024) notes the need to institutionalize transparent, participatory decision-making from the planning stage, with coordination among the Office of the Comptroller General (*Controladoria-Geral da União, CGU*), Ministry of Transport (*Ministério dos Transportes, MT*), Federal Court of Accounts (*Tribunal de Contas da União, TCU*), and civil society; it also records that interinstitutional workshops and dialogues helped align criteria for logistics planning.

For renewable diesel (HVO), effective supply depends on estimating scalable production capacity to safely meet demand; making the product competitive requires regulatory and R&D instruments that reduce costs and expand domestic production, leveraging available feedstocks (CNT, 2024).

Finally, in terms of institutional capacities, ANP's authorization and monitoring of plants, combined with data from EPE and the International Center for Renewable Energies (*Centro Internacional de Energias Renováveis, CIBiogás*), indicate growing, though still consolidating, institutionality (BERNI, 2024). Long-term planning should link energy, mining, and waste

management to avoid shifting impacts to other supply chains; recycling and reuse indicators associated with transport technologies should be part of interministerial monitoring (BERNI, 2023). Effective bioeconomy for transport requires public governance to overcome political, regulatory, and financing challenges, connecting environment, industry, and energy; state coordination is a condition for turning guidelines into sector execution, including in OTR trucking (BERNI, 2019; 2022). Policy design in early phases is identified as essential to create markets, standardize criteria, and speed up adoption of low-carbon solutions; alignment among sectoral ministries, regulation, and science-technology-innovation (ST&I) is a condition for turning climate goals into concrete execution (BERNI, 2019).

Technologies Suited to OTR Trucking

From a technology standpoint, evidence centers on biomethane and biodiesel, Diesel-cycle options for heavy-duty fleets that are suitable for medium- and long-distance applications in OTR trucking.

Biomethane is a purified gas obtained from processing different biomass sources, such as wastewater, livestock manure, industrial and municipal organic waste, or energy crops (CNT, 2022). Production starts with biogas obtained through anaerobic digestion, in which bacteria break down the material and release mainly methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2), as well as hydrogen sulfide (H_2S) and ammonium (NH_4) in smaller proportions (CNT, 2022). After this step, the biogas is purified to remove CO_2, H_2S, and water (H_2O), yielding a gas with a high CH_4 content suitable for use in heavy-duty vehicles (CNT, 2022). With characteristics similar to natural gas for vehicles, this biomethane can be sold as compressed biomethane gas for CNG applications (CBG in Europe) or liquefied biomethane (LBM/bio-LNG; LBG in Europe), expanding logistics options and driving range (CNT, 2022). For vehicle use, heavy trucks have already been tested and approved to operate on biomethane: in 2020, Scania launched models suitable for biomethane, vehicle natural gas, or blends; the R 410 6x2 runs on the Otto cycle, meets Proconve P8 (Brazil's Phase 8 heavy-duty emissions standard, aligned with Euro VI and broadly comparable to U.S. heavy-duty emissions standards under EPA/NHTSA – 40 CFR Parts 1036, 1037, 1065, 1066), and maintains performance on medium and long distances (CNT, 2022).

Beyond operational advantages, biomethane also brings environmental benefits. In emissions accounting, the CO_2 released during combustion of biomethane is treated as biogenic and therefore carbon-neutral (CNT, 2022). For fuel comparisons, the well-to-wheel (WTW) methodology is used, accounting for emissions across the fuel's full life cycle (CNT, 2022). This approach highlights biomethane's potential to cut local pollutants and help mitigate climate change by replacing fossil fuels in the Diesel cycle (CNT, 2022). The diversity of eligible feedstocks, agricultural, urban, and livestock residues, enhances technological resilience and supply security, allowing the value chain to expand with demand (CNT, 2022).

On infrastructure, biomethane can already be integrated into existing distribution networks or supplied through dedicated solutions such as small-scale local pipelines, improving logistics fit for long-distance routes (BERNI, 2024). Decentralized production also offers flexibility and can be scaled through multiple technological pathways that support regional availability, an advantage for road freight (BERNI, 2022). Adoption in Brazil still faces challenges, such as the limited number of heavy-duty truck models with compatible engines, which narrows fleet purchasing options (CNT, 2022). Despite these limitations, available technologies and ongoing development signal strong expansion potential in OTR trucking, especially with public policies and initiatives that support the required infrastructure.

Biodiesel is a biofuel produced from vegetable oils (soy, palm, sunflower) and animal fats which, once purified to meet quality specifications, can partially or fully replace petroleum diesel in Diesel-cycle engines (ABIOVE, 2025). On supply and inputs, feedstock participation in 2024 was: soy 72.4%; fatty materials 14.9%; tallow 5.6% (EPE, 2025a). For vehicle use, heavy-vehicle manufacturers report full compatibility with biodiesel without structural changes beyond meeting quality specifications, maintaining performance, reliability, and durability; there is an indication of potential CO_2 reductions up to 77% compared with petroleum diesel, according to Scania's institutional material (SCANIA, 2024).

As a reference point, renewable diesel (HVO) is a drop-in fuel compatible with Diesel-cycle engines and associated with use-phase emissions reductions, but its mandatory share in Brazil is capped at up to 3%, and domestic supply is still incipient compared with the two routes analyzed in this section (CNT, 2024; EPE, 2025b; BRASIL, 2025c).

Decree No. 12,614/2025 regulates Law No. 14,993/2024 (Fuels of the Future), integrating RenovaBio, Mover, and PBE Veicular to reduce emissions with cost-effectiveness (BRASIL, 2025c; EPE, 2025b). Through 2031, the assessment follows WTW; from 2032 onward, it shifts to cradle-to-grave, covering energy generation, extraction, production, and use within the LCA scope (BRASIL, 2025c; EPE, 2025b). EPE reports fuel-specific carbon-intensity studies measured in grams of CO_2 equivalent per megajoule (gCO_2e/MJ) as the standardization basis (EPE, 2025b). This architecture, comparable metrics, targets, and certification via RenovaCalc, the RenovaBio life-cycle carbon-intensity calculator, strengthens comparisons among routes in heavy transport and supports technically cost-effective choices (STOPPE, 2024).

At the sector level, the policy provides: (i) a Biomethane Program with reduction targets in the natural gas market and proof of compliance via physical use or CGOB (BRASIL, 2024d; BRASIL, 2025c; EPE, 2025b); (ii) a ramp-up of the mandatory biodiesel blend under Law No. 13,033/2014 through 2030, with technical feasibility bands (BRASIL, 2024d; BRASIL, 2025c; EPE, 2025b); and (iii) the PNDV for renewable diesel with a minimum share to be set by the CNPE, capped at 3%, with ANP responsible for percentages and procedures and voluntary additions allowed (BRASIL, 2024d; BRASIL, 2025c; EPE, 2025b). Taken together, these guidelines provide regulatory tracks for expanding biomethane and biodiesel in OTR trucking, with LCA-based comparability and traceability (EPE, 2025b).

Empirical Evidence and Industry Practices

For biomethane, supply and regionalization are advancing: in 2024 there were six plants authorized by ANP, with planned expansion of about 761.9 thousand Nm³/day (normal cubic meter at 0 °C and 1 atm). By July 2025, the authorized fleet totaled 14 plants and ~842 thousand Nm³/day, indicating a growth trajectory with volume predominance in the sanitation sector and a greater number of plants in agribusiness (BERNI, 2024; EPE, 2025a). Brazil has more than 700 plants producing biogas for thermal, electric, and mechanical uses, although only 16 produced vehicle-grade biomethane in base year 2019; production is concentrated in the Southeast, with São Paulo above 155 million Nm³/year and a regional share near 83% (CNT, 2022). In WTW analyses, heavy vehicles running on biomethane showed lower GHG emissions than pure-diesel equivalents across all categories, with an average reduction of 64% (higher in buses, lower in articulated trucks), reinforcing environmental fit for applications in OTR trucking (CNT, 2022). Compiled evidence suggests room to expand purification-to-biomethane routes and regional co-benefits tied to energy use of waste (SILVA; GODOY JR., 2023).

For biodiesel, recent numbers indicate scale and capacity: 9.1 billion liters consumed in 2024 (+20.9% vs. 2023) and 15.3 billion L of installed capacity across 58 plants (55 with the Social Biofuel Seal – SBS, a MAPA certification for plants that purchase from family farming) (EPE, 2025a). The socioeconomic dimension is significant: 68 plants in 16 states and 14,000+ direct jobs with wages 40% above the agro-industry average; integration with family farming via the Social Fuel Seal (~76,000 families) and use of waste cooking oil above 101,000 m³ in 2024 (ABIOVE, 2025).

As a third comparison point, renewable diesel (HVO) is gaining traction internationally: it was the 3rd most-produced biofuel in 2022 (~13.3 billion L) and has the largest growth projection through 2027, with strong participation by North America and Europe, and the first projects announced in Brazil (CNT, 2024). In standardized protocols, HVO showed consistent reductions in local pollutants and about 5% lower consumption in the Braunschweig cycle compared with fossil diesel, signaling relevant technical performance for heavy transport (CNT, 2024).

On the regulatory–operational horizon, EPE consolidates targets and legal tracks for biodiesel, biomethane, and HVO as a reference for sector monitoring and planning (EPE, 2025b). Looking at land use to 2050, studies indicate the possibility of expanding biofuels without opening new natural areas, provided expansion focuses on part of the 56 million hectares of degraded pasture, with emphasis on more productive crops and pathways (IEMA, 2025).

Conclusions

This study leads to four main conclusions. First, Brazil's recently consolidated regulatory framework links climate, waste, and energy and provides governance, traceability, and life-cycle measurement tools that can anchor decisions in OTR trucking. Second, for biodiesel, the combination of a phased blend mandate and direct contracting increased predictability and scale, but average eligibility for CBIOs is still below what is desirable, and dependence on imported inputs adds cost and supply risk. Third, for biomethane, quality standardization and new traceability mechanisms have advanced and RenovaBio eligibility is high; even so, the lack of mandatory participation in road transport, the CAPEX for purification/conditioning, and the need for dedicated infrastructure limit diffusion in OTR trucking. Fourth, interministerial coordination has evolved, but federal heterogeneity, network logistics, and structural constraints in the road mode still condition the economic effectiveness of the routes analyzed. In this context, renewable diesel (HVO) appears as a relevant technological reference, yet with an initially limited mandatory share and incipient domestic supply, which is why it is treated here briefly and as a comparison point.

Practical implications emerge from this diagnosis: long-term effectiveness depends on regulatory stability in mandates and targets; on efficiency and traceability gains in feedstock chains (to raise CBIO eligibility and reduce uncertainty); on wider use of firm contracts and infrastructure for biomethane (including integration with existing networks where viable); and on consolidated, comparable LCA metrics (gCO_2e/MJ) to guide cost-effective choices in medium- and long-distance applications. These points serve as areas of focus for policymakers and private actors, without any prescriptive intent.

This study has limitations. It relies mainly on official documents, sector literature, and secondary data; it does not perform its own cradle-to-grave LCA modeling; it does not measure TCO with primary fleet data from Brazil; it does not test causality between instruments and market outcomes; and it does not cover in detail tax interactions or fine-grained regional infrastructure effects. In addition, some sources have different time windows, which can introduce lags in comparisons.

These limitations outline a future research agenda: LCA studies with primary data for biodiesel and biomethane in different supply chains and regions; TCO comparisons by operational typology using time series of actual costs; econometric evaluation of the CBIO market (price, liquidity, and compliance) and its effects on investment; implementation analyses of the CGOB and its interaction with biomethane targets; and territorial studies on waste availability, network-connection logistics, and local socioeconomic impacts. Such work can reduce uncertainty, improve comparisons across routes, and support public and private decisions with stronger empirical grounding.

References

ALEXY, Robert. Teoria dos direitos fundamentais. 3. ed. São Paulo: Juspodivm, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS (ABIOVE). O que é biodiesel? São Paulo: ABIOVE, [s.d.]. Disponível em: <https://abiove.org.br/biodiesel/sobre/\>. Acesso em: 15 nov. 2025.

BARDIN, Laurence. Análise de conteúdo. 1. ed. São Paulo: Edições 70, 2015.

BERNI, Mauro. Biogás e biometano emergem como elementos chaves para a transição energética brasileira. Revista O Papel, São Paulo, v. LXXXV, n. 6, p. 60–61, jun. 2024.

BERNI, Mauro. Novos impactos ambientais com a oferta de fontes de energias renováveis para a transição energética. Revista O Papel, jun. 2023, p. 76–77.

BERNI, Mauro. Transição energética à moda brasileira. Revista O Papel, São Paulo, v. LXXXIII, n. 3, p. 62–63, mar. 2022.

BERNI, Mauro. Transição energética: RenovaBio e o Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis 2018–2022. Revista O Papel, São Paulo, v. LXXX, n. 2, p. 56–57, fev. 2019.

BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E. Fundamentals of Thermodynamics. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2020. 592 p.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução nº 886, de 16 de junho de 2022. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 20 jun. 2022d.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução nº 906, de 18 de novembro de 2022. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 21 nov. 2022e.

BRASIL. Decreto nº 10.102, de 6 de novembro de 2019. Altera o Decreto nº 9.888, de 27 de junho de 2019, que dispõe sobre metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis e institui o Comitê RenovaBio. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 nov. 2019c.

BRASIL. Decreto nº 10.712, de 2 de junho de 2021. Regulamenta a Lei nº 14.134/2021. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 jun. 2021c.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305/2010, dispõe sobre as diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 13 jan. 2022c.

BRASIL. Decreto nº 11.015, de 29 de março de 2022. Altera dispositivos do Decreto nº 7.830/2012 e do Decreto nº 8.235/2014, aprimorando o Sistema de Cadastro Ambiental Rural (CAR) e sua integração com políticas de mitigação de emissões. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 mar. 2022h.

BRASIL. Decreto nº 11.075, de 19 de maio de 2022. Regulamenta os arts. 6º, 11 e 12 da Lei nº 12.187/2009, institui o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE) e dispõe sobre o sistema nacional de registro de emissões e compensações. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 19 maio 2022b.

BRASIL. Decreto nº 11.141, de 21 de julho de 2022. Altera o Decreto nº 9.888, de 27 de junho de 2019, para dispor sobre o prazo para comprovação do atendimento à meta anual individual de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 22 jul. 2022f. (Revogado pelo Decreto nº 11.499/2023).

BRASIL. Decreto nº 11.499, de 12 de abril de 2023. Altera o Decreto nº 9.888, de 27 de junho de 2019, para dispor sobre a composição do Comitê RenovaBio e redefinir a data para comprovação de atendimento à meta individual por distribuidor de combustíveis. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 13 abr. 2023b.

BRASIL. Decreto nº 11.550, de 5 de junho de 2023. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) e dispõe sobre o registro, monitoramento e verificação de emissões e remoções. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 6 jun. 2023c.

BRASIL. Decreto nº 12.044, de 22 de janeiro de 2024. Institui a Estratégia Nacional de Bioeconomia – E2B. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 6 jun. 2024f.

BRASIL. Decreto nº 12.082, de 27 de junho de 2024. Institui a Estratégia Nacional de Economia Circular – ENEC. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 jun. 2024e.

BRASIL. Decreto nº 12.153, de 25 de abril de 2024. Altera dispositivos regulamentares da Lei nº 14.134/2021. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 26 abr. 2024b.

BRASIL. Decreto nº 12.437, de 16 de abril de 2025. Altera o Decreto nº 9.888, de 27 de junho de 2019, para dispor sobre as alterações na Política Nacional de Biocombustíveis – RenovaBio realizadas pela Lei nº 15.082, de 30 de dezembro de 2024, e o Decreto nº 2.953, de 28 de janeiro de 1999, para modernizar o procedimento administrativo sancionador da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 17 abr. 2025b.

BRASIL. Decreto nº 12.614, de 21 de janeiro de 2025. Regulamenta a Lei nº 14.993, de 30 de julho de 2024, que institui o Programa Nacional de Combustível do Futuro, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 22 jan. 2025c.

BRASIL. Decreto nº 6.938, de 13 de agosto de 2009. Regulamenta a Lei nº 11.540, de 12 de novembro de 2007, que dispõe sobre o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNDCT. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 ago. 2009a.

BRASIL. Decreto nº 7.830, de 17 de outubro de 2012. Regulamenta o Sistema de Cadastro Ambiental Rural (CAR) e institui o Programa de Regularização Ambiental (PRA). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 out. 2012b.

BRASIL. Decreto nº 8.235, de 5 de maio de 2014. Estabelece normas complementares aos Programas de Regularização Ambiental (PRA) dos Estados e do Distrito Federal. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 6 maio 2014.

BRASIL. Decreto nº 9.308, de 15 de março de 2018. Dispõe sobre a definição das metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis de que trata a Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 16 mar. 2018a. (Revogado pelo Decreto nº 9.888/2019).

BRASIL. Decreto nº 9.365, de 8 de maio de 2018. Regulamenta o art. 27, § 1º, da Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, para estabelecer as condições para a participação dos produtores de pequeno porte na comercialização de biodiesel por meio de leilões públicos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 maio 2018b.

BRASIL. Decreto nº 9.888, de 27 de junho de 2019. Dispõe sobre a definição das metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis de que trata a Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e institui o Comitê da Política Nacional de Biocombustíveis – Comitê RenovaBio. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 jun. 2019a.

BRASIL. Decreto nº 9.964, de 8 de agosto de 2019. Altera o Decreto nº 9.888, de 27 de junho de 2019, para dispor sobre critérios, procedimentos e responsabilidades para regulação e fiscalização da Certificação de Biocombustíveis e do lastro do Crédito de Descarbonização da Política Nacional de Biocombustíveis – RenovaBio. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 ago. 2019b.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Nota de esclarecimento: Lei Combustível do Futuro. NE-EPE-DPG-SDB-2024-81. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2025b.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Análise de conjuntura dos biocombustíveis: ano 2024. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2025a.

BRASIL. Lei Complementar nº 177, de 12 de janeiro de 2021. Dispõe sobre a execução orçamentária do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNDCT e veda seu contingenciamento. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 jan. 2021a.

BRASIL. Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004. Autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 mar. 2004a.

BRASIL. Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis n.º 5.655/1971, 8.631/1993 e 9.074/1995 e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 mar. 2004b.

BRASIL. Lei nº 11.540, de 12 de novembro de 2007. Dispõe sobre o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNDCT e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 nov. 2007.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 29 dez. 2009b.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605/1998 e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e institui normas gerais sobre a política ambiental e o uso do solo rural. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 maio 2012a.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 27 dez. 2017.

BRASIL. Lei nº 13.986, de 7 de abril de 2020. Institui o Fundo Garantidor Solidário (FGS) e altera legislações correlatas. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 8 abr. 2020.

BRASIL. Lei nº 14.134, de 8 de abril de 2021. Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural (Nova Lei do Gás) e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 abr. 2021b.

BRASIL. Lei nº 14.554, de 25 de abril de 2023. Altera a Lei nº 11.540/2007 para aprimorar a governança, transparência e planejamento do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNDCT. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 26 abr. 2023a.

BRASIL. Lei nº 14.592, de 30 de maio de 2023. [Ementa]. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 maio 2023d.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 30 de julho de 2024. Institui o Programa Nacional de Combustível do Futuro e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 31 jul. 2024d.

BRASIL. Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Dispõe sobre o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa (MBRE) e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 12 dez. 2024c.

BRASIL. Lei nº 15.082, de 30 de dezembro de 2024. Altera a Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, que dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), para nela incluir os produtores independentes de matéria-prima destinada à produção de biocombustível; e altera a Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 dez. 2024a.

BRASIL. Lei nº 15.184, de 4 de agosto de 2025. Altera a Lei nº 11.540/2007 e a Lei nº 14.554/2023 para aprimorar governança, transparência, execução orçamentária e articulação institucional do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNDCT. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 4 ago. 2025a.

BRASIL. Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo (ANP), e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 ago. 1997.

BRASIL. Medida Provisória nº 1.136, de 29 de agosto de 2022. Altera a Lei nº 11.540, de 12 de novembro de 2007, que dispõe sobre o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNDCT. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 ago. 2022a. (Vigência encerrada / não convertida em lei).

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Empresa de Planejamento e Logística – EPL. Plano Nacional de Logística 2025. Brasília, DF: MINFRA/EPL, 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Portaria nº 71, de 21 de março de 2022. Institui o Programa Nacional de Redução de Emissões de Metano – Metano Zero. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 22 mar. 2022g.

CANOTILHO, José Joaquim Gomes. Direito Constitucional e Teoria da Constituição. 7. ed. São Paulo: Almedina Brasil, 2003.

CNT – Confederação Nacional do Transporte. Biometano: uma alternativa limpa para o modal rodoviário. Brasília, 2022.

CNT – Confederação Nacional do Transporte. Diesel verde: uma opção de baixo carbono para caminhões e ônibus rodoviários. Brasília, 2024.

DESCLAUX, L.; PINTO JÚNIOR, H. Q. Políticas públicas em contextos intersetoriais: o desafio da coordenação e o exemplo do biogás. Revista Brasileira de Energia, v. 27, n. 4, p. 108–138, 2021.

FLICK, Uwe. An Introduction to Qualitative Research. 7. ed. London: SAGE Publications, 2022.

HEYWOOD, John B. Internal Combustion Engine Fundamentals. 2. ed. New York: McGraw Hill, 2018. 1056 p.

HOWLETT, Michael; RAMESH, M.; PERL, Anthony. Studying public policy: principles and processes. 4th ed. Oxford: Oxford University Press, 2020.

RAKOPOULOS, Constantine D.; GIAKOUMIS, Evangelos G. Diesel Engine Transient Operation: Principles of Operation and Simulation Analysis. London: Springer, 2009. 410 p.

SILVA, Marcos Johari Provezani; GODOY JR., Ederaldo. Efeitos da Nova Lei do Gás sobre a cadeia de biometano. Revista Política Agrícola, Brasília, v. 32, n. 4, p. 44–54, out./nov./dez. 2023.

SOUZA, Ivan José de; BRAND, Fabiane Cristina. Transporte rodoviário de cargas: vantagens e desvantagens no uso de combustíveis renováveis. Bento Gonçalves: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Bento Gonçalves, 2022.

STONE, Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 4. ed. Warrendale: SAE International, 2017. 494 p.

STOPPE, Thaís de Castro. Muito chão pela frente: o caso do RenovaBio e a descarbonização da matriz brasileira de combustíveis. 2024. Dissertação. USP, São Paulo, 2024.

YUAN, Qien. The evolution and future trajectory of diesel engine technology: applications, environmental challenges, and innovative solutions for sustainability. *Highlights in Science, Engineering and Technology (EMIS)*, v. 119, 2024.

VALORAÇÃO DE DANOS AMBIENTAIS PARA FINS DE COMPENSAÇÃO AMBIENTAL DECORRENTES DE LANÇAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS *IN NATURA* GERADOS EM JOINVILLE/SC

Marcelo Mauri da Cunha
marcelomauricunha@gmail.com

Palavras-chave: Valoração Ambiental; Perícia; Poluição Hídrica; Emergia;

Resumo

O Autor deste trabalho atua como perito judicial por mais de uma década na região do vale de Itajaí, norte e nordeste catarinense.

No caso em tela, apresenta a metodologia de valoração econômica aplicada na quantificação dos danos ambientais decorrentes da poluição hídrica ocasionada pelo lançamento irregular de efluentes domésticos e industriais na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, em Joinville/SC, no período compreendido entre junho de 1973 à agosto de 2005. O estudo integrou o laudo pericial elaborado pelo Autor em 2023, requerido na fase de cumprimento de sentença da Ação Civil Pública nº 5013151-94.2018.4.04.7201/SC, tendo por finalidade estimar o *quantum debeatur* referente aos danos irreversíveis causados aos recursos hídricos e ecossistemas associados, notadamente o manguezal e a Baía da Babitonga. A metodologia adotada baseou-se em parâmetros técnico-científicos, contemplando análises de campo, modelagens ambientais e dados hidrológicos, além da aplicação conceito de emergia, que corresponde à energia solar que foi previamente requerida de forma direta ou indireta para produzir o recurso hídrico afetado. A perícia concluiu pela existência de dano ambiental irreversível, com valor de referência equivalente a R$ 219.380.855,93 (duzentos e dezenove milhões, trezentos e oitenta mil, oitocentos e cinquenta e cinco reais e noventa e três centavos) propondo a conversão do montante em medidas compensatórias voltadas à recuperação dos recursos hídricos da região, sob supervisão da Secretaria do Meio Ambiente, Conselho Municipal do Meio Ambiente - COMDEMA e Ministério Público Federal.

Introdução

A valoração econômica de danos ambientais constitui um instrumento essencial para a aplicação prática do princípio do poluidor-pagador e para a efetivação da reparação integral prevista na Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981). Em casos de poluição hídrica, a estimativa do *quantum debeatur* demanda a integração de variáveis físico-ambientais, sociais e econômicas, de forma a traduzir, em termos monetários, a magnitude dos impactos causados aos recursos naturais e aos serviços ecossistêmicos afetados.

O presente estudo pericial foi desenvolvido no âmbito da Ação Civil Pública nº 5013151-94.2018.4.04.7201/SC, instaurada pelo Ministério Público Federal em desfavor da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento – CASAN, em razão dos danos ambientais decorrentes da ausência de tratamento e disposição adequada de esgotos sanitários durante o período de gestão da concessionária de águas e saneamento no Município de Joinville/SC. O objeto central da perícia consistiu na valoração econômica dos danos ambientais irreversíveis verificados na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, cuja degradação repercutiu diretamente sobre o Complexo Estuarino da Baía da Babitonga, um dos mais importantes ecossistemas costeiros do sul do Brasil.

O Município de Joinville está situado na região nordeste do Estado de Santa Catarina, distante 183km de Florianópolis, a uma latitude 26º18'14" sul e a uma longitude 48º50'45" oeste. Possui uma área de 1.127,946 km², com população estimada para o ano de 2022 de 616.317 habitantes (IBGE, 2025). A Área da lide está situada na porção sudoeste e mais densamente povoada da cidade, denominada como bacia do Rio Cachoeira.

A metodologia adotada envolveu a análise integrada de parâmetros físico-químicos, hidrológicos e ecológicos, associada ao levantamento histórico da ocupação urbana e da gestão do saneamento básico no período avaliado. A metodologia para a valoração dos danos utilizou a formulação do VERA (Valor Econômico do Recurso Ambiental), recepcionada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na Norma Brasileira – NBR 14.653-6:2008.

O resultado pericial expressou a dimensão econômica do dano ambiental e fundamentou a proposição de medidas compensatórias a serem revertidas em obras e ações de proteção aos recursos hídricos locais, sob supervisão da Secretaria do Meio Ambiente - SAMA, Conselho Municipal do Meio Ambiente - COMDEMA e Ministério Público Federal - MPF, alcançando valor de referência equivalente a R$ R$ 219.380.855,93 (duzentos e dezenove milhões, trezentos e oitenta mil, oitocentos e cinquenta e cinco reais e noventa e três centavos).

Material e Métodos

A metodologia para a valoração dos danos utilizou a formulação do VERA (Valor Econômico do Recurso Ambiental), abarcada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na Norma Brasileira – NBR 14.653-6:2008. O método utiliza a formulação do Valor Econômico do Recurso Ambiental e considera o valor de uso direto e o valor de uso indireto dos recursos hídricos afetados. Importa destacar que a referida metodologia está presente dentre as listadas na Coletânea da CEAT/MPMG (valoração econômica de danos ambientais) de 2020.

Cálculo monetário dos serviços afetados

Calculou-se na valoração o Valor de Uso Direto (VUD) e o Valor de Uso Indireto (VUI) dos recursos hídricos afetados. Para a quantificação da carga de DBO, proveniente do lançamento de esgotos sanitários, foram utilizados os seguintes dados: i) população do município de Joinville-SC dos anos entre 1973 e 2005 (dados fornecidos diretamente pela biblioteca do IBGE). Especificamente com relação aos anos de 1973 e 2005, tendo em vista que a CASAN iniciou em meados de 1973, e encerrou em agosto de 2005, foi realizado cálculo de percentual correspondente ao ano para evitar superestimação dos valores; ii) carga *per capita* de DBO: 0,054kg DBO/hab.dia (VON SPERLING, 2014); iii) percentual de esgoto coletado e não tratado: Esse dado foi obtido através do Parecer Técnico de empresa contratada pela CASAN, presente nos autos do processo.

A carga de DBO foi obtida pela Equação 1:

Carga de DBO = População x Carga per capita x % de esgoto não tratado
Equação 1

Para fins de cálculo, o ponto de lançamento desses efluentes está situado na mancha urbana de Joinville-SC, próximo ao distrito industrial, no Rio Cachoeira, com coordenadas: 710896,33m E / 7093038,84m S, com diferença de cota de 15,81 metros, considerando a baia como sendo cota 0,00m. Na Figura 01 pode-se observar a localização do ponto de lançamento em relação as sub-bacias do Rio cachoeira.

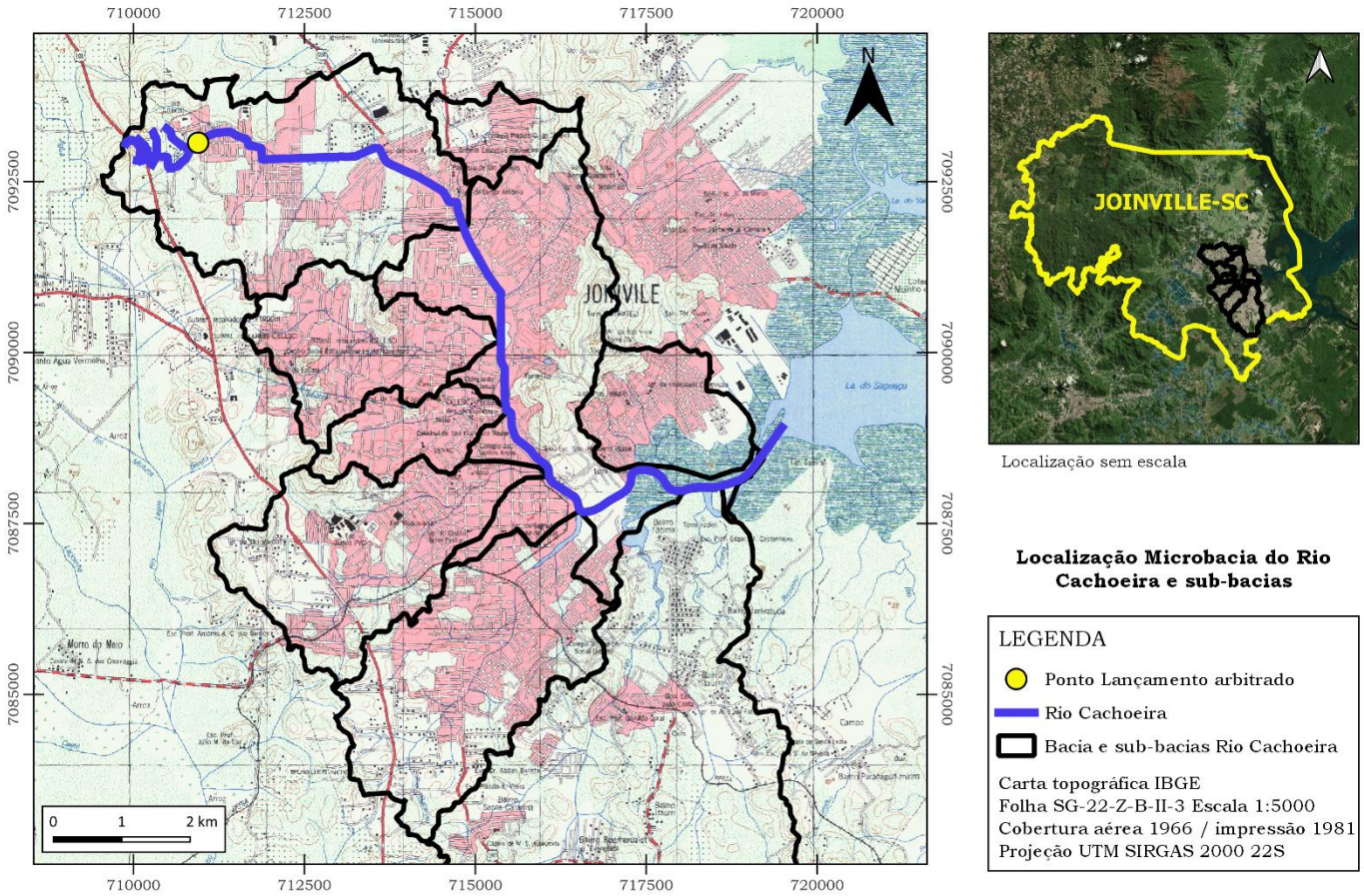


Figura 01 – Localização da bacia do Rio Cachoeira e ponto de lançamento arbitrado.
Fonte: Autor, 2023

Segundo dados obtidos junto ao Atlas Ambiental da Região de Joinville (2003), com exceção da região próxima a nascente, os níveis de DBO5 obtidos no rio Cachoeira encontram-se fora do padrão estabelecido para rios Classe III. As concentrações mais altas, cm valores de 6 a 7 vezes acima do padrão, foram registradas na área do distrito industrial norte.

Cálculo do VUD

O VUD foi estimado no valor de mercado estabelecido para o benefício advindo da utilização das águas do Rio Cachoeira para diluição dos esgotos sanitários lançados em seu curso e afluentes. Tendo em vista constituir importante insumo econômico, o recurso hídrico foi calculado, inicialmente, com base nas informações dos valores dos Preços Públicos Unitários - PPU R$/m³ (efluentes não tratados – R$ 0,10 por m³) presente no Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia hidrográfica do

Rio Cubatão do Norte (UNIVILLE, 2007), e, cálculo da vazão proveniente do esgoto lançado nos cursos do Rio Cachoeira e seus afluentes, tendo como base o consumo de água *per capita* médio diário para municípios do porte de Joinville é de 200 L/hab.dia.

Assim, VUD é calculado pela Equação 2:

VUD = PPU R$/m³ efluentes não tratados x vazão m³
Equação 2

Cálculo do VUI

O valor monetário dos serviços ambientais afetados pelo lançamento dos esgotos sanitários *in natura* no Rio Cachoeira foi obtido pela metodologia emergética ou ecoenergética, que utiliza a energia solar incorporada (emergia) aos recursos ambientais para expressar a contribuição da natureza na produção da massa de água necessária à diluição dos efluentes até atingir o padrão para o parâmetro considerado.

Assim, para a determinação do Valor de Uso Indireto (VUI) foi analisado o serviço ambiental associado à água superficial poluída. A emergia do serviço ambiental e seu respectivo valor monetário foram quantificados, inicialmente, por meio da estimativa do lançamento nas águas de matéria orgânica biodegradável expressa por DBO, em kg/dia, presente nos esgotos brutos. Em seguida, foi determinada a massa de água, em kg/dia, necessária à diluição do parâmetro DBO até os padrões de referência estabelecidos para as classes do Rio Cachoeira, conforme estabelecida pela Portaria nº024/79, que enquadra os cursos d`água do Estado de Santa Catarina.

Calculou-se, então, a energia potencial (serviço ecossistêmico) em Joule (J)/dia, associada ao escoamento gravitacional da massa de água durante a diluição do poluente (DBO), a qual foi convertida, posteriormente, em uma medida emergética equivalente (SeJ/dia), por meio do fator de conversão de energia em emergia (energia solar incorporada), denominado Transformidade Solar ou Índice de Transformidade, expresso em emergia por Joule (SeJ/J). Os índices de transformidade são calculados por pesquisadores em todo o mundo (ODUM, 1996 apud MPMG, 2020), sendo amplamente divulgados em periódicos e endereços eletrônicos especializados (ORTEGA, 2000 apud MPMG, 2020).

Por fim, a emergia do serviço ambiental associado à massa de água foi obtida, em termos monetários (dólar), utilizando o índice de equivalência emergia/dólar (3,0 x 1012 SeJ/U$), determinado para o Brasil (ORTEGA, 2000). Esse índice permite comparar a emergia do serviço afetado à emergia do dinheiro que circula no país e, determinado ano a fim de possibilitar a conversão dos valores de energia solar em dinheiro. Para a determinação dos valores em reais (R$), foi utilizado o câmbio atual (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2023).

Consideradas as características dos poluentes lançados, verificou-se que seus principais impactos estão relacionados ao lançamento de matéria orgânica no curso d'água, expresso na forma da concentração do parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). A DBO é utilizada como um dos parâmetros indicadores da qualidade da água nos principais órgãos de monitoramento do Brasil. Geralmente, uma quantidade elevada de DBO indica a contaminação por esgoto doméstico sem o devido tratamento (SPERLING, 1996).

No que concerne às interferências sobre os recursos hídricos, os serviços ecossistêmicos afetados podem ser quantificados em termos da energia necessária a diluição dos efluentes até os níveis máximos permitidos e pelo consumo do oxigênio dissolvido em suas águas devido à decomposição da matéria orgânica.

A avaliação desses serviços ecossistêmicos afetados seguiu os seguintes passos: quantificação da carga de DBO introduzida no meio aquático; determinação da massa de água necessária à diluição das emissões calculadas até as concentrações máximas admissíveis na legislação em vigor; cálculo da energia associada à massa de água necessária à diluição do parâmetro crítico até os padrões estabelecidos na legislação; estimativa do oxigênio aquático dissolvido consumido pela decomposição da matéria orgânica as zonas de recuperação e as águas limpas.

Determinação da massa de água necessária à diluição das emissões

A massa total de água comprometida na diluição da carga de DBO lançada, até a concentração de DBO permitida pela legislação, foi obtida por meio da Equação 3, abaixo:

$$M = d\frac{W_{DBO5}}{c}$$

Equação 3

Onde:
M = massa de água, em kg;
d = densidade da água (1 kg/L);
WDBO5 = carga emitida de DBO em kg;
c = concentração de DBO no rio a montante do lançamento, em kg/L.

Cálculo da energia potencial da massa de água

A energia potencial (Ep) da massa de água utilizada na diluição dos poluentes foi calculada, em Joules, por meio da Equação 4:

$$E_p = Mgh$$

Equação 4

Onde:
M = massa de água para diluir a DBO até os níveis permitidos, em kg (Equação 3),
g = aceleração da gravidade, (9,8m/s2),
h = diferença de altitude entre o ponto de lançamento e o ponto de depuração.

Para cálculo da diferença de altitude (h), foram coletadas cotas de altitude do ponto de lançamento com auxílio de GPS (GNSS>MARCA CHC - MODELO I-80-RTK-NTRIP) e ponto da depuração por meio do modelo de Streeter-Phelps.

Para utilização do modelo, estimou-se a vazão de esgotos pela Equação 5:

Vazão = consumo per capita água x População x R x % de esgoto não tratado
Equação 5

R é o coeficiente de retorno de água para o esgoto (0,8) de acordo com Von Sperling (2014). Ainda segundo esse autor, o consumo de água *per capita* médio diário para municípios do porte de Joinville é de 200 L/hab.dia. Realizou-se estudo de autodepuração do esgoto sanitário no Rio Cachoeira. Para a quantificação da carga de DBO proveniente do lançamento de esgotos sanitários de Joinville, foram utilizados dados apresentados pela literatura técnica pertinente (carga per capita de DBO), dados populacionais fornecidos pela Biblioteca do IBGE e, dados sobre o percentual de esgoto tratado em Joinville-SC obtidos no Parecer Técnico para Arbitrar novo valor de indenização à execução provisória da Sentença nº 2008.7201.002546-1 referente ao sistema de esgotamento sanitário de JOINVILLE (MMEYER, 2011), presente nos autos do processo nº 5013151-94.2018.4.04.7201/SC (EV.9, EXEC.SENT.7, Página 4).

Como informado alhures, para estabelecer a diferença de altitude entre o ponto de lançamento dos esgotos e o início da zona de água limpa (local onde ocorreu a depuração da DBO), o ponto 1 foi registrado na zona industrial em meio a malha urbana e o Ponto 2 – calculado e indicado no mapa pelo ano que representa – sinaliza o início da zona de águas limpas.

A Figura 01, apresenta a localização desses pontos considerados para fins de determinação das altitudes, cuja diferença foi utilizada no cálculo da energia potencial. A distância do ponto de lançamento e o início da zona de águas limpas foi obtida por meio Google Earth Pro®.

Considerando que os cálculos foram feitos para cada ano especificamente, levando em conta a carga de DBO diretamente proporcional com a população, por consequência as distâncias necessárias para a depuração estimadas pela equação Streeter-Phelps também variam. Contudo, todos os pontos de depuração encontram-se em cota 0m, o primeiro e mais próximo a malha urbana está praticamente dentro da lagoa do Saguaçu.

A diferença da altitude dos Pontos 1 e 2 forneceu o valor (h), para calcular a energia potencial necessária ao escoamento gravitacional da massa de água requisitada, a fim de diluir a matéria orgânica até atingir o limite estabelecido pela Portaria nº 024/79 (10mg/L – Classe 3). O software Excel® foi utilizado para todos os cálculos.

Diante do exposto, a emergia dos serviços ecossistêmicos afetados (capacidade de autodepuração do corpo d´água) e seu respectivo valor monetário foi calculado por meio dos seguintes passos: i) conversão dos serviços ecossistêmicos previamente calculados em uma medida emergética equivalente, no caso energia solar incorporada, adotando-se índices de transformidade, que avaliam a qualidade do fluxo da energia dos serviços ambientais associados a determinado recurso natural ou antrópico.

Tais índices, calculados por pesquisadores em todo o mundo, são amplamente divulgados em periódico científicos e sites da internet especializados; ii) conversão da emergia calculada em valores monetários por meio do índice de equivalência emergia/ dólar para o Brasil, o que permite comparar a emergia do serviço afetado à emergia do dinheiro que circula no país em determinado ano, convertidos os valores de energia em dinheiro; e iii) conversão do valor em dólar para real pelo câmbio atual.

Isto posto, tendo vista que os cálculos foram refeitos para cada ano em que a gestão CASAN esteve à frente do saneamento da cidade de Joinville-SC (resultados na tabela abaixo), ao final tivemos um valor total correspondente ao valor do dano ambiental que totalizou o montante de: R$ 219.380.855,93 (duzentos e dezenove milhões, trezentos e oitenta mil, oitocentos e cinquenta e cinco reais e noventa e três centavos).

Tendo como base o valor acima, foi calculado o valor para cada habitante em R$/ano, cálculo esse necessário, uma vez que, a população de Joinville foi modificando ao longo do tempo.

Assim, o valor por habitante, por ano, ficou em R$ 20,61 (vinte reais e sessenta e um centavo), com um desvio padrão de R$3,64 (três reais e sessenta e quatro centavos), resultando em um coeficiente de variação de 17,68%.

Quando se trabalha com algo mutável, vivo, biológico como é um sistema para tratar esgoto sanitário, calculando o dano, dificilmente conseguir-se-á ter um valor absoluto, daí a razão de se ter um espectro de variabilidade, que, por óbvio, precisa ser aceitável estatisticamente para ser uma avaliação.

Tabela 01 – Cálculo do valor do dano ambiental pelo método VERA + emergia.

VALORAÇÃO COM MODELO EMERGIA															
Ano	Pop. (IBGE)	% Efluente não tratado	DBO (kg/dia)	VUD (dia)	VUD ano	massa H_2O	EP	Vazão L/S	EMERGIA	EMERGIA U$/dia	EMERGIA R$/dia	VUI R$/ano	VUD+VUI (R$)	% dias do ano	CUSTO/R$/HABITANTE/ANO
1973	137.033	1	7399,782	2740,66	1000340,9	739978200	1,14651E+11	253,7648148	3,196E+15	1065,25826	5581,9533	2037412,96	R$ 1.572.948,95	51,78%	R$ 5,94
1974	146.482	1	7910,028	2929,64	1069318,6	791002800	1,22556E+11	271,262963	3,416E+15	1138,71229	5966,85239	2177901,12	R$ 3.247.219,72	100%	R$ 22,17
1975	156.582	1	8455,428	3131,64	1143048,6	845542800	1,31007E+11	289,9666667	3,652E+15	1217,22701	6378,26956	2328068,39	R$ 3.471.116,99	100%	R$ 22,17
1976	166.681	1	9000,774	3333,62	1216771,3	900077400	1,39456E+11	308,6685185	3,887E+15	1295,73397	6789,64599	2478220,79	R$ 3.694.992,09	100%	R$ 22,17
1977	177.432	1	9581,328	3548,64	1295253,6	958132800	1,48451E+11	328,5777778	4,138E+15	1379,30939	7227,58123	2638067,15	R$ 3.933.320,75	100%	R$ 22,17
1978	188.876	1	10199,304	3777,52	1378794,8	1019930400	1,58026E+11	349,7703704	4,405E+15	1468,27202	7693,74539	2808217,07	R$ 4.187.011,87	100%	R$ 22,17
1979	201.058	1	10857,132	4021,16	1467723,4	1085713200	1,68218E+11	372,3296296	4,689E+15	1562,97166	8189,97152	2989339,61	R$ 4.457.063,01	100%	R$ 22,17
1980	235.803	1	12733,362	4716,06	1721361,9	1273336200	1,97288E+11	436,6722222	5,499E+15	1833,0701	9605,2873	3505929,87	R$ 5.227.291,77	100%	R$ 22,17
1981	244.150	1	13184,1	4883	1782295	1318410000	2,04272E+11	452,1296296	5,694E+15	1897,95746	9945,29711	3630033,45	R$ 5.412.328,45	100%	R$ 22,17
1982	252.793	1	13650,822	5055,86	1845388,9	1365082200	2,11503E+11	468,1351852	5,895E+15	1965,14586	10297,3643	3758537,97	R$ 5.603.926,87	100%	R$ 22,17
1983	261.742	1	14134,068	5234,84	1910716,6	1413406800	2,1899E+11	484,7074074	6,104E+15	2034,71301	10661,8962	3891592,11	R$ 5.802.308,71	100%	R$ 22,17
1984	271.008	1	14634,432	5420,16	1978358,4	1463443200	2,26743E+11	501,8666667	6,32E+15	2106,74445	11039,3409	4029359,43	R$ 6.007.717,83	100%	R$ 22,17
1985	280.602	0,9751	14775,21055	5612,04	2048394,6	1477521055	2,28924E+11	506,6944633	6,381E+15	2127,01065	11145,5358	4068120,57	R$ 6.116.515,17	100%	R$ 21,80
1986	290.535	0,9668	15168,01885	5810,7	2120905,5	1516801885	2,3501E+11	520,1652556	6,551E+15	2183,55857	11441,8469	4176274,13	R$ 6.297.179,63	100%	R$ 21,67
1987	300.820	0,9598	15591,25994	6016,4	2195986	1559125994	2,41568E+11	534,6796963	6,733E+15	2244,48754	11761,1147	4292806,87	R$ 6.488.792,87	100%	R$ 21,57
1988	311.469	0,9464	15917,81013	6229,38	2273723,7	1591781013	2,46627E+11	545,8782622	6,874E+15	2291,49707	12007,4447	4382717,3	R$ 6.656.441,00	100%	R$ 21,37
1989	343.632	0,9443	17522,55167	6872,64	2508513,6	1752255167	2,71491E+11	600,9105511	7,568E+15	2522,51255	13217,9658	4824557,51	R$ 7.333.071,11	100%	R$ 21,34
1990	321.597	0,9419	16357,25957	6431,94	2347658,1	1635725957	2,53436E+11	560,948545	7,064E+15	2354,75936	12338,9391	4503712,75	R$ 6.851.370,85	100%	R$ 21,30
1991	347.151	0,9414	17647,62938	6943,02	2534202,3	1764762938	2,73429E+11	605,19991	7,622E+15	2540,5185	13312,3169	4858995,67	R$ 7.393.197,97	100%	R$ 21,30
1992	361.596	0,9408	18370,23391	7231,92	2639650,8	1837023391	2,84625E+11	629,9805867	7,934E+15	2644,54324	13857,4066	5057953,41	R$ 7.697.604,21	100%	R$ 21,29
1993	372.203	0,9399	18891,01438	7444,06	2717081,9	1889101438	2,92694E+11	647,8399994	8,159E+15	2719,51379	14250,2523	5201342,07	R$ 7.918.423,97	100%	R$ 21,27
1994	380.906	0,9391	19316,27653	7618,12	2780613,8	1931627653	2,99283E+11	662,4237493	8,342E+15	2780,7337	14571,0446	5318431,28	R$ 8.099.045,08	100%	R$ 21,26
1995	389.538	0,9388	19747,70682	7790,76	2843627,4	1974770682	3,05967E+11	677,2190267	8,529E+15	2842,84157	14896,4898	5437218,79	R$ 8.280.846,19	100%	R$ 21,26
1996	396.276	0,9376	20063,61239	7925,52	2892814,8	2006361239	3,10862E+11	688,0525511	8,665E+15	2888,31872	15134,7901	5524198,39	R$ 8.417.013,19	100%	R$ 21,24
1997	409.142	0,929	20525,01757	8182,84	2986736,6	2052501757	3,18011E+11	703,8757741	8,864E+15	2954,74172	15482,8466	5651239,01	R$ 8.637.975,61	100%	R$ 21,11
1998	418.596	0,9246	20899,82853	8371,92	3055750,8	2089982853	3,23818E+11	716,7293733	9,026E+15	3008,69878	15765,5816	5754437,28	R$ 8.810.188,08	100%	R$ 21,05
1999	428.011	0,9222	21314,43419	8560,22	3124480,3	2131443419	3,30242E+11	730,9476744	9,205E+15	3068,3846	16078,3353	5868592,39	R$ 8.993.072,69	100%	R$ 21,01
2000	429.604	0,9159	21247,61239	8592,08	3136109,2	2124761239	3,29206E+11	728,6561178	9,176E+15	3058,76507	16027,929	5850194,07	R$ 8.986.303,27	100%	R$ 20,92
2001	446.064	0,9099	21917,17621	8921,28	3256267,2	2191717621	3,3958E+11	751,61784	9,465E+15	3155,15418	16533,0079	6034547,88	R$ 9.290.815,08	100%	R$ 20,83
2002	453.766	0,9035	22138,78937	9075,32	3312491,8	2213878937	3,43014E+11	759,2177426	9,561E+15	3187,05718	16700,1796	6095565,56	R$ 9.408.057,36	100%	R$ 20,73
2003	461.576	0,896	22332,89318	9231,52	3369504,8	2233289318	3,46021E+11	765,8742519	9,645E+15	3214,99999	16846,5999	6149008,97	R$ 9.518.513,77	100%	R$ 20,62
2004	477.971	0,8861	22870,62557	9559,42	3489188,3	2287062557	3,54353E+11	784,3150057	9,877E+15	3292,4109	17252,2331	6297065,08	R$ 9.786.253,38	100%	R$ 20,47
2005	487.045	0,884	23249,58012	9740,9	3555428,5	2324958012	3,60224E+11	797,3107037	1,004E+16	3346,96446	17538,0938	6401404,22	R$ 5.782.928,45	58,08%	R$ 6,90
2006	496.051	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
TOTAL					76998502							148021063	R$ 219.380.855,93		

O coeficiente de variação, definido como o desvio-padrão em porcentagem da média, é a medida estatística mais utilizada na avaliação da precisão do valor encontrado. Desta forma, ao analisar o coeficiente de variação encontrado (17,68%), que é obtido pela divisão do desvio padrão pela média, temos que ele demonstra média dispersão dos dados, uma vez que, ficou entre 15 a 30 %. Aplicando-se o coeficiente de variação encontrado, de média dispersão, pode-se afirmar que qualquer valor entre R$ 180.418.815,92 a R$ 258.342.895,24 (coeficiente de variação de 17,68% e média de R$ 219.380.855,93) está correto para o valor do dano, tendo como base a metodologia utilizada.

Considerações finais

Trata-se de Perícia Judicial com cerne voltado a valoração de danos ambientais decorrentes de lançamento de esgotos *in natura* em corpos hídricos sem o prévio tratamento. Mais especificamente, com objetivo de atender o cumprimento do item "c" da sentença proferida nos autos originários 2000.72.01.001059-8, que estabeleceu a seguinte obrigação: "*pagar importância a ser apurada por meio de perícia que será realizada na fase de liquidação, às suas expensas, a título de ressarcimento dos danos ambientais irreversíveis causados durante o período em que explorou a atividade de saneamento básico neste município e pela perda da qualidade ambiental sofrida pela comunidade neste interregno (...)".*

Embora os ativos intangíveis e danos causados ao meio ambiente sejam difíceis de serem mensurados, os métodos de valoração podem auxiliar os envolvidos (empresas, comunidade e governo) realizar ações e destinar recursos que combatam a degradação do meio ambiente. Segundo Motta (1998), "quando os custos da degradação ecológica não são pagos por aqueles que a geram, estes custos são externalidades para o sistema econômico".

Nessa esteira, vários são os métodos que podem ser utilizados no processo de valoração econômica dos bens ambientais, e a sua escolha depende especificamente de cada caso.

No caso em tela, para o cálculo do valor de uso direto, considerou-se o preço público unitário do uso do recurso hídrico para fins de lançamento de efluentes sem prévio tratamento apresentado pelo comitê de bacia hidrográfica da área Objeto. Para o cálculo do valor de uso indireto, utilizou-se o conceito de emergia, que corresponde à energia solar que foi previamente requerida de forma direta ou indireta para produzir o recurso hídrico afetado.

As datas, os dados populacionais, os volumes de efluentes e todos os demais dados utilizados nos cálculos foram obtidos em consulta a fontes oficiais ou bibliografias especializadas. Dados técnicos e documentos foram requeridos a CASAN, Município de Joinville e, a empresa de saneamento Águas de Joinville.

Conforme consta no laudo pericial o valor do dano é correspondente a R$ 219.380.855,93, considerando o coeficiente de variação (CV), é possível estimar que qualquer valor entre 258.342.895,94 e 180.418.815,92 está correto.

Agradecimentos

O autor agradece a colaboração técnica e o apoio institucional recebidos durante a execução deste trabalho. Agradece especialmente aos profissionais: Juscelino Tomas, Marjorye Otília Nunes da Silva, Alexandre M. Mazzer e João Guilherme W. da Cunha, que contribuíram nas atividades de campo, análise de dados e revisão técnica do laudo pericial; à equipe da Polícia

Militar Ambiental de Santa Catarina, pelo suporte logístico durante as vistorias na Bacia do Rio Cachoeira; e aos representantes técnicos do Ministério Público Federal e CASAN, pela cooperação e transparência nas etapas de levantamento e validação das informações.

Referências bibliográficas

ÁGUAS DE JOINVILLE. Investimentos na coleta e tratamento de esgoto. Disponível <https://www.aguasdejoinville.com.br/?page_id=49972#:~:text=Atualmente%2C%20o%20percentual%20de%20cobertura,e%20devolvido%20limpo%20aos%20rios> Consultado em abril de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14653-6: Avaliação de bens — Parte 6: Recursos naturais e ambientais. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 16 p.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Cotação. Brasília: BCB, 2023. Disponível em: https://www.bcb.gov.br/. Acesso em: abril. 2023.

BRASIL. Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília: Senado Federal, 1981. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil03/leis/l6938.htm. Acesso em: 28 mar. 2023.

FATMA. Atlas Ambiental da Região de Joinville: Complexo Hídrico da Baía da Babitonga. Coordenação de Joachim L. W. Knie. 2a edição. Florianópolis: FATMA/GTZ, 2003.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados - Joinville Código: 4209102. Disponível em < https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sc/joinville.html> consultado em março de 2025.

MACCARIN, Marta Beatriz. Análise da salubridade ambiental na bacia hidrográfica do rio Cachoeira utilizando o método Indicador de Salubridade Ambiental – ISA. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Joinville, 2019.

MMEYER CONSULTORIA AMBIENTAL. Parecer Técnico para Arbitrar novo valor de indenização à execução provisória da Sentença nº 2008.7201.002546-1 referente ao sistema de esgotamento sanitário de JOINVILLE. Florianópolis, 2011.

MOTTA, R.S. Manual para valoração econômica de recursos naturais. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. IPEA/MMA/PNUD/CNPq. 1998.

MPMG. Valoração econômica de danos ambientais. Coletânea da central de apoio técnico do Ministério Público de Minas Gerais. Alexandra Fátima Saraiva; Paula Santana Diniz – Belo Horizonte: CEAF, 2020

ORTEGA, E. 2000. Tabela de Transformidades - (emergia / Joule, emergia / kg, emergia / US$) de recursos naturais, industriais e produtos de ecossistemas. Disponível em <http://www.unicamp.br/fea/ortega/curso/transformid.htm>.

SANTA CATARINA. Portaria n.º 024, de 19 de setembro de 1979. Enquadra os cursos d'água do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: Secretaria de Planejamento e Coordenação Geral, 1979. Publicada no Diário Oficial do Estado de Santa Catarina em 24 set. 1979.

UNIVILLE. Crescimento populacional em Joinville - entre 1950 e 2016. Disponível em: https://www.univille.edu.br/pt-br/cursos/cienciaseconomicas/observatorio-economico/populacao/781532 > Consultado em março de 2023.

UNIVILE. Elaboração do plano diretor dos recursos hídricos da bacia do Rio Cubatão do Norte. Gonçalves, Monica Lopes; Oliveira, Fabiano Antônio de; Zanotelli, Cladir Teresinha; Oliveira, Terezinha Maria Novais. Joinville/SC, 2007.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos, cap.2 e 3, p. 22-166, Ed. UFMG, Minas Gerais, 1996.

VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais. 2014.

O NOVO MARCO ESTADUAL DA COMPENSAÇÃO DE RESERVA LEGAL: PERSPECTIVAS, INOVAÇÕES E DESAFIOS NA REGULARIZAÇÃO FUNDIÁRIA DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO EM MATO GROSSO

1 Edivaldo Ostroski, 2 Alex Fabiano da Silva Lopes, 3 Maria Aparecida Pereira Pierangeli
1 Advogado, e-mail: edivaldo@ostroski.adv.br; 2 Unemat, e-mail: afslopes@gmail.com; 3 Unemat, e-mail: mapp@unemat.br

Palavras-chave: Compensação de Reserva Legal; Unidades de Conservação; Mato Grosso.

Resumo

O presente artigo analisa o Decreto nº 1.757/2025, marco inovador instituído pelo Estado de Mato Grosso para regulamentar a compensação de Reserva Legal (RL) em imóveis rurais, com foco na regularização fundiária de Unidades de Conservação (UCs). Com base na legislação federal e nas necessidades locais, o estudo examina os aspectos normativos, políticos, socioeconômicos e jurídicos envolvidos na aplicação do novo modelo. A partir de uma abordagem qualitativa, identificam-se avanços como a criação do sistema SIMCAR COMPENSAÇÃO, além de fragilidades operacionais e riscos de convalidação de irregularidades fundiárias. Argumenta-se que, apesar dos desafios estruturais e políticos, o novo marco representa uma alternativa eficiente e economicamente viável à desapropriação tradicional, contribuindo para a consolidação de UCs e a regularização ambiental de imóveis privados. Por fim, o trabalho apresenta propostas normativas e administrativas para o aprimoramento da política, indicando caminhos para sua replicação nacional.

Introdução

Desde a Conferência de Estocolmo de 1972, a temática ambiental ganhou centralidade na agenda internacional, destacando a urgência de mecanismos eficazes de proteção dos ecossistemas (LAGO, 2007). No Brasil, esse compromisso encontra amparo no artigo 225 da Constituição Federal de 1988, que estabelece o direito de todos a um meio ambiente ecologicamente equilibrado e impõe ao Poder Público o dever de preservá-lo mediante políticas públicas estruturadas (BRASIL, 1988). Uma das principais ferramentas jurídicas criadas com esse intuito foi o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza – SNUC –, instituído pela Lei nº 9.985/2000, que estabelece diretrizes para a proteção de áreas ambientais especialmente protegidas (BRASIL, 2000).

Contudo, a mera criação legal de uma Unidade de Conservação (UC), sobretudo na categoria de parque estadual, não assegura sua consolidação efetiva enquanto espaço protegido. A eficácia de sua proteção está condicionada à regularização fundiária, que requer a desapropriação ou aquisição de imóveis particulares inseridos em seu perímetro (COELHO; REZENDE, 2016). O que se verifica, na prática, é a persistência de extensas áreas em UCs com domínio privado, dificultando sua gestão e ampliando a vulnerabilidade à ocupação antrópica irregular. Ao mesmo tempo, milhares de produtores rurais no estado de Mato Grosso enfrentam déficit de Reserva Legal (RL) em suas propriedades, uma exigência legal prevista no Código Florestal (Lei nº 12.651/2012).

Neste contexto, a compensação de RL surge como alternativa legal e ambientalmente estratégica. Trata-se de um mecanismo que permite ao proprietário com déficit adquirir área localizada em UC ainda não regularizada e doá-la ao Poder Público, atendendo simultaneamente ao cumprimento da legislação ambiental e à regularização fundiária da unidade (ANTUNES, 2011; BRASIL, 2012). A operacionalização dessa alternativa, no entanto, depende de regulamentações infralegais claras, sistemas informatizados e estrutura institucional robusta.

O Decreto nº 1.757/2025, recentemente editado pelo Estado de Mato Grosso, representa um avanço normativo relevante ao estabelecer critérios e procedimentos específicos para a compensação de RL em nível estadual. A criação do sistema SIMCAR COMPENSAÇÃO, os fluxos procedimentais claros e a definição de instrumentos como a Certidão de Habilitação demonstram uma tentativa concreta de consolidar a política pública ambiental por meio da regularização fundiária. No entanto, sua efetividade ainda depende de fatores como vontade política, capacidade técnica da administração pública e mecanismos de controle e transparência.

A presente pesquisa tem como objetivo geral analisar criticamente o novo marco estadual da compensação de Reserva Legal instituído pelo Decreto nº 1.757/2025, verificando sua eficácia como instrumento jurídico e ambiental para a regularização fundiária de Unidades de Conservação estaduais no Mato Grosso. De forma específica, busca-se: (i) examinar os fundamentos normativos da compensação de RL; (ii) identificar as principais inovações e entraves do Decreto nº 1.757/2025; (iii) avaliar o potencial da compensação de RL como alternativa à desapropriação tradicional; e (iv) propor melhorias normativas e administrativas para a efetiva aplicação da política.

Material e Métodos

A pesquisa adotou abordagem qualitativa, de natureza aplicada e com método dedutivo, voltada à análise normativa, institucional e política do Decreto nº 1.757/2025, editado pelo Governo do Estado de Mato Grosso. O estudo é classificado como exploratório-descritivo, considerando seu objetivo de investigar e interpretar o marco legal da compensação de Reserva Legal (RL) sob múltiplas dimensões: jurídica, ambiental, política e socioeconômica.

A seleção da amostra se concentrou em fontes documentais oficiais, especialmente a legislação ambiental brasileira em vigor, incluindo a Constituição Federal de 1988, o Código Florestal (Lei nº 12.651/2012), a Lei nº 9.985/2000 – SNUC – , decretos estaduais e federais correlatos, além do Decreto nº 1.757/2025, foco principal da investigação. Complementarmente, foram consultadas publicações científicas indexadas, dissertações, estudos técnicos, relatórios de órgãos ambientais e bancos de dados públicos como o SIMCAR e o MapBiomas.

Os métodos de coleta de dados envolveram pesquisa documental e bibliográfica sistematizada, com foco em materiais recentes e pertinentes à temática ambiental e fundiária. A coleta seguiu critérios de relevância, atualidade, confiabilidade e aderência temática. A análise dos dados foi conduzida por meio da técnica qualitativa de análise de conteúdo e complementada pelo método SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats), conforme sintetizado na Tabela 1, que permitiu identificar forças, fraquezas, oportunidades e ameaças do instrumento jurídico em estudo.

FORÇAS	**FRAQUEZAS**
Consolidação de parques estaduais	Ausência de políticas públicas específicas
Redução do déficit de RL em imóveis rurais	Falta de banco de dados integrado
Mitigação de ocupações irregulares	Déficit de pessoal técnico e recursos
Segurança jurídica ambiental	Inexistência de diagnóstico fundiário atualizado
OPORTUNIDADES	**AMEAÇAS**
Efetivar compromissos internacionais	Desinteresse político e burocracia excessiva
Estimular programas de PSA e REDD+	Risco de judicialização por lacunas normativas
Regularizar áreas de alto valor ecológico	Descontinuidade administrativa
Integrar políticas ambientais e fundiárias	Falta de validação técnica no SIMCAR

Tabela 1: Análise SWOT da compensação de Reserva Legal em UCs estaduais
Fonte: Dados da pesquisa (2026)

Em relação às considerações éticas, o estudo não envolveu seres humanos ou experimentação animal, tratando-se exclusivamente de análise de dados secundários e fontes documentais públicas. Portanto, não se aplicam os protocolos de submissão a comitês de ética.

As limitações do estudo incluem a ausência de dados oficiais sistematizados sobre a totalidade de áreas passíveis de regularização fundiária em UCs no estado, o que dificultou a elaboração de projeções quantitativas mais precisas. Além disso, as informações extraídas de documentos públicos dependem da qualidade e da atualização dos sistemas de informação consultados.

O conjunto metodológico adotado assegura rigor analítico, replicabilidade parcial e fundamentação teórica e normativa sólida, permitindo a interpretação crítica do marco legal estudado e a proposição de estratégias para sua efetiva implementação.

Resultados e Discussão

Alternativas Legais aos Processos de Desapropriação de Áreas Particulares

O estudo revelou que o Estado de Mato Grosso enfrenta um cenário de inércia na regularização fundiária de Unidades de Conservação (UCs), especialmente em parques estaduais, devido à ausência de desapropriações regulares e à carência de planejamento orçamentário. Como alternativa, destaca-se a compensação de Reserva Legal (RL), prevista no art. 66 do Código Florestal (Lei nº 12.651/2012), que permite a doação ao Poder Público de áreas privadas localizadas em UCs, mitigando simultaneamente o passivo ambiental de imóveis rurais e a ausência de domínio público nas UCs (ANTUNES, 2011; SOUZA, 2019).

Essa estratégia representa uma inovação ao compatibilizar interesses ambientais e fundiários, conforme observado por Saretta (2017), que também defende o uso da compensação como solução alternativa à desapropriação. No entanto, limitações estruturais como a inexistência de banco de dados, ausência de diagnóstico fundiário e falta de políticas públicas comprometem sua efetividade.

O Decreto nº 1.757/2025 como Marco Regulamentar da Compensação de Reserva Legal. O Sistema SIMCAR Compensação

O Decreto nº 1.757/2025 consolida o marco legal para operacionalização da compensação de RL em Mato Grosso. Entre os avanços, destacam-se: (i) definição clara das etapas processuais; (ii) exigência de CAR validado; e (iii) institucionalização do SIMCAR COMPENSAÇÃO. Trata-se de um regulamento que sistematiza e legitima um processo voluntário e bilateral de compensação ambiental, sem ônus direto ao Estado, o que é coerente com as diretrizes do Código Florestal e com práticas internacionais de gestão ambiental eficiente (HARBER, 2015).

O novo decreto se alinha a princípios de legalidade e eficiência administrativa, criando condições operacionais para que o Estado exerça sua função ecológica. No entanto, o sucesso da norma depende de sua implementação, que, conforme discutido a seguir, ainda enfrenta sérios entraves técnicos e institucionais.

O SIMCAR COMPENSAÇÃO é o principal instrumento tecnológico do novo marco. Este sistema digital tem como finalidade promover a regularização ambiental de imóveis com déficit de RL, cruzando dados de imóveis devedores e áreas disponíveis em UCs ainda não regularizadas.

A digitalização do processo traz benefícios como transparência, rastreabilidade e redução da burocracia. Além disso, permite controle público sobre a habilitação e a doação de áreas, conferindo maior segurança jurídica e ambiental ao procedimento. Essa proposta se destaca positivamente em relação a estudos anteriores, que apontavam a falta de mecanismos de controle como um dos principais obstáculos à consolidação de UCs (MEDEIROS, 2006; BURSZTYN, 2018).

Regras de Compensação Interestadual e Integração Federativa. Pontos Críticos e Riscos Jurídicos

Outro ponto de inovação do decreto é a possibilidade de compensações interestaduais, desde que observados critérios como o mesmo bioma e a existência de termos de cooperação federativa. Essa medida antecipa a perspectiva de uma política nacional integrada de compensação fundiária, promovendo a harmonia entre estados com excedentes e déficits de RL.

Trata-se de uma solução promissora, também reconhecida por Saretta (2017), que apontou a necessidade de articulação intergovernamental para superar as limitações de alcance exclusivamente estadual das políticas ambientais.

Apesar dos avanços, a pesquisa identificou fragilidades jurídicas relevantes. Dentre elas, destacam-se: (i) indefinição sobre a responsabilidade por passivos ambientais ocultos; (ii) risco de convalidação de ocupações irregulares por meio da doação; e (iii) exigência de cadeia dominial sem regularização registral definitiva.

Esses pontos podem comprometer a segurança jurídica do processo e gerar litígios futuros. São aspectos que, conforme Antunes (2011) e Justen Filho (2016), precisam ser tratados com clareza normativa para garantir legitimidade e evitar judicializações que inviabilizem a política pública.

Oportunidades para Políticas Públicas e Gestores. Integração com Políticas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA)

A compensação de RL em UCs também se revela como uma estratégia transversal de política pública. Ao integrar aspectos ambientais, fundiários, sociais e econômicos, abre-se espaço para ações coordenadas entre diferentes setores da administração pública.

A regularização fundiária viabilizada por essa política pode gerar impactos positivos como acesso ao crédito rural, valorização fundiária e conservação ambiental efetiva, conforme apontado por Ambrosio (2014) e Kury (2009). Para tanto, é fundamental investir na capacitação de gestores públicos e na criação de núcleos técnicos interdisciplinares, como sugerido por Saretta (2017).

Por fim, os dados indicam que a política de compensação de RL pode ser integrada a programas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), como o previsto na Lei nº 14.119/2021. A doação de áreas estratégicas em UCs pode ser reconhecida como prestação de serviços ecossistêmicos, permitindo contrapartidas financeiras via fundos estaduais, convênios com ONGs ou programas internacionais como o REDD+.

Essa possibilidade reforça a tese de que o novo marco pode gerar um ciclo virtuoso de valorização da conservação, desde que haja vontade política e estrutura institucional adequada (MIRANDA, 2018).

Discussão dos Resultados

A análise dos dispositivos legais e operacionais introduzidos pelo Decreto nº 1.757/2025 confirma o potencial da compensação de Reserva Legal (RL) como instrumento viável para a regularização fundiária de Unidades de Conservação (UCs) no Estado de Mato Grosso. Este novo marco jurídico, ao propor soluções alternativas à desapropriação tradicional, responde a um desafio histórico da política ambiental brasileira: a consolidação territorial e jurídica de áreas de proteção integral, muitas vezes criadas apenas no papel.

Os achados desta pesquisa dialogam diretamente com os estudos de Saretta (2017) e Souza (2019), que já indicavam a ineficiência do modelo fundado exclusivamente na desapropriação, em razão de limitações orçamentárias, ausência de planejamento estratégico e conflitos de uso da terra. A compensação de RL, ao transferir para o setor privado a responsabilidade pela aquisição e posterior doação de áreas de UC ao poder público, representa uma alternativa que alia viabilidade econômica e efetividade ecológica.

A introdução do sistema SIMCAR COMPENSAÇÃO representa um avanço relevante ao conferir transparência, rastreabilidade e eficiência ao processo. Entretanto, a sua eficácia dependerá da robustez técnica dos dados inseridos, da interoperabilidade com sistemas federais e da disponibilidade de recursos humanos qualificados para validar e fiscalizar as operações. A ausência de banco de dados fundiário atualizado e validado, evidenciada por este estudo, permanece como obstáculo estrutural à plena implementação da política.

Outro ponto discutido foi a regulamentação da compensação interestadual, que amplia as possibilidades de regularização ambiental ao permitir a compensação em UCs situadas em outros estados, desde que respeitados critérios legais. Essa medida se mostra alinhada com tendências internacionais de governança ambiental descentralizada e poderá, se bem executada, inaugurar uma política nacional de compensação fundiária, conforme sugerem Bursztyn (2018) e Harber (2015).

Contudo, os riscos jurídicos identificados, como a indefinição quanto à responsabilidade por passivos ambientais ocultos e a possível convalidação de ocupações irregulares mediante a doação, exigem atenção normativa. Tais fragilidades podem comprometer a segurança jurídica e gerar passivos futuros para o Estado. A ausência de critérios objetivos para a valoração das áreas habilitadas também abre margem para distorções econômicas, incluindo especulação fundiária em áreas de UC.

A integração do sistema com políticas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) surge como oportunidade estratégica para ampliar o alcance e a sustentabilidade financeira da iniciativa. Reconhecer a doação de áreas em UCs como prestação de serviços ecossistêmicos, conforme previsto na Lei nº 14.119/2021, pode atrair recursos nacionais e internacionais e estimular novos modelos de compensação, mais equilibrados e sustentáveis.

Dentre as limitações deste estudo, destaca-se a impossibilidade de acesso a dados georreferenciados completos e atualizados sobre o total de áreas aptas à compensação no estado, o que restringe a análise quantitativa. Adicionalmente, como o decreto é recente, não há ainda evidências empíricas suficientes sobre sua aplicação prática, o que limita a avaliação de seus efeitos concretos.

Assim, esta pesquisa contribui para o debate acadêmico e institucional sobre a viabilidade da compensação de RL como ferramenta de regularização fundiária, mas também alerta para a necessidade de ajustes normativos, investimentos em estrutura e capacitação técnica, além de vontade política para garantir sua efetiva implementação.

Conclusões

Este estudo teve como objetivo analisar criticamente o Decreto nº 1.757/2025, que institui o novo marco estadual para a compensação de Reserva Legal no Estado de Mato Grosso, avaliando sua eficácia como instrumento jurídico e ambiental de regularização fundiária de Unidades de Conservação. A pesquisa demonstrou que a norma representa um avanço relevante ao propor uma alternativa legal à tradicional e ineficiente desapropriação de áreas privadas inseridas em UCs.

Dentre os principais resultados, destacam-se a criação do sistema SIMCAR COMPENSAÇÃO, que oferece suporte tecnológico ao processo de compensação, e a regulamentação da compensação interestadual, que amplia o alcance da política e fortalece a cooperação federativa. Além disso, a proposta de integração com programas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) aponta para novas possibilidades de sustentabilidade financeira e valorização da conservação ambiental.

Por outro lado, foram identificados riscos jurídicos e operacionais que podem comprometer a efetividade do decreto, como a ausência de banco de dados fundiário estruturado, lacunas quanto à responsabilização por passivos ambientais e potenciais distorções no processo de valoração das áreas. Tais desafios exigem ações coordenadas entre o poder público, sociedade civil e setor privado para garantir a legitimidade e a eficiência do modelo.

As contribuições deste trabalho residem na articulação entre os aspectos legais, institucionais e ambientais da compensação de RL como estratégia para consolidar juridicamente as Unidades de Conservação e regularizar passivos ambientais privados. Ao oferecer uma análise crítica e propositiva, o estudo reforça a importância de políticas públicas inovadoras, integradas e tecnicamente embasadas.

Como proposta para pesquisas futuras, recomenda-se a investigação empírica da aplicação do decreto em casos concretos, bem como estudos comparativos com outros estados que implementem modelos semelhantes de compensação fundiária ambiental. Tais abordagens poderão aprofundar o entendimento sobre os limites e as potencialidades da política, fortalecendo sua base técnica e contribuindo para sua replicabilidade nacional.

Referências

AMBROSIO, R. V. ***Situação fundiária dos parques estaduais de Minas Gerais*****.** 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

ANTUNES, P. B. ***Áreas protegidas e propriedade constitucional*****.** São Paulo: Atlas, 2011.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. ***Regulamenta o art. 225, §1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências*****.** Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm. Acesso em: 19 out. 2025.

BURSZTYN, M. A. ***Fundamentos de política e gestão ambiental: caminhos para a sustentabilidade*****.** Rio de Janeiro: Garamond, 2018. e-book.

COELHO, H. A.; REZENDE, E. N. **A efetiva implantação das unidades de conservação ambiental por meio da desapropriação.** *Revista do Direito Público*, Londrina - PR, p. 165-195, ago. 2016.

KURY, K. A. ***Regularização fundiária em unidade de conservação: o caso do Parque Estadual do Desengano/RJ*****. 2009.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campos dos Goytacazes/RJ, 2009.

LAGO, A. A. C. D. *Estocolmo, Rio,* ***Joanesburgo: o Brasil e as três conferências ambientais das Nações Unidas*****.** Brasília: Thesaurus Editora, 2007.

MEDEIROS, R. **Evolução das tipologias e categorias de áreas protegidas no Brasil.** *Ambient. soc.*, Campinas, v. 9, n. 1, p. 41-64, jun. 2006.

MIRANDA, E. D. ***Tons de verde: a sustentabilidade da agricultura no Brasil*.** São Paulo: Metalivros, 2018.

SARETTA, C. B. ***Compensação de Reserva Legal em Unidade de Conservação: trajetórias, fortalezas, oportunidades e desafios*.** 2017. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

SOUZA, A. L. A. P. ***Environmental compensation of legal reserve: the difficulties, challenges and opportunities of implement this mechanism in the state of Mato Grosso*** – *Brazil*. 2019. 213 f. Tese (Doutorado) – University of Florida, Gainesville, 2019.

INCENTIVOS AMBIENTAIS E COMPETIÇÃO FISCAL: UMA ANÁLISE DO FATOR ÓLEO VEGETAL NO ICMS ECOLÓGICO DO RIO DE JANEIRO

1 Yuri Guedes Maia, 2 Karen Nicolay, 3 Mayara Montilla Cotrim, 4 Daniel Caldas Monte, 5 Vanessa Gonçalves Domingues, 6 Mayara Rousseau, 7 Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

1 Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), e-mail: ygm77@live.com; 2 Fundação CEPERJ, e-mail: karennicolay13@gmail.com; 3 Fundação CEPERJ, e-mail: mayaramontilha@id.uff.br; 4 Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ), e-mail: daniel.monte@aluno.cefet-r.br; 5 Fundação CEPERJ, e-mail: vanessa.mj@hotmail.com; 6 Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, e-mail: Dacostamayara8@edu.unirio.br; 7 Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), e-mail: krishnamurti@puc-rio.br

Palavras-chave: Indicadores ambientais; Política ambiental; Reciclagem.

Resumo

A Lei nº 5.100/2007 institui a política do ICMS Ecológico, que visa incentivar financeiramente os municípios fluminenses que adotem ações voltadas à conservação ambiental, com base em indicadores específicos. Em 2013, o óleo vegetal comestível foi incorporado como um dos subindicadores dessa política, denominado "Fator OV". Este trabalho tem como objetivo analisar o impacto da inclusão do Fator OV nos indicadores ambientais e financeiros do ICMS Ecológico (ICMS-E), assim como avaliar os resultados obtidos pelos municípios do estado do Rio de Janeiro a partir de sua implementação. Classificado como resíduo sólido inerte (Classe II B), o óleo vegetal apresenta elevado potencial poluidor, o que torna seu descarte inadequado e um risco ambiental relevante. A partir da análise dos índices de reciclagem, observou-se a necessidade de aprimoramento das políticas públicas voltadas à gestão desse resíduo. Os resultados evidenciam que a inclusão do Fator OV contribuiu positivamente para a política do ICMS Ecológico, configurando-se como um instrumento econômico e socialmente relevante.

Introdução

A produção global de óleo vegetal comestível atinge aproximadamente 204 milhões de toneladas por ano (Santos *et al*., 2022). Segundo o *United States Department of Agriculture* (USDA, 2021), o Brasil ocupa posição de destaque nesse cenário, figurando como o sétimo maior produtor mundial, com uma produção anual de 9,85 milhões de toneladas. Esse protagonismo é impulsionado, sobretudo, pelo óleo de soja, visto que a soja é o grão com maior volume de produção e exportação no território nacional (EMBRAPA, 2025).

Apesar da relevância econômica, a destinação do óleo comestível no Brasil constitui um problema expressivo. Estima-se que apenas 2,5% desse resíduo seja coletado e reutilizado (Filho *et al.*, 2020), o que revela desafios de ordem ambiental, educacional, social e política. Tal cenário contrasta com o elevado potencial de reaproveitamento do óleo residual, que pode ser transformado em sabão, glicerina, lubrificantes, biodiesel e até ração para animais (Oliveira *et al*., 2022). Essa versatilidade evidencia uma oportunidade estratégica de valorização econômica e de mitigação de impactos ambientais.

Os óleos vegetais são formados majoritariamente por triglicerídeos (95% a 98%), além de componentes menores como ácidos graxos livres e compostos fenólicos (Tamothran *et al*., 2022). Embora versáteis, essa estrutura química confere ao óleo um alto potencial poluidor quando descartado incorretamente. O despejo em pias e ralos gera depósitos de gordura, óleo e graxa (FOG), que causam corrosão e entupimento das redes de esgoto (Zhou *et al*., 2022). Ao atingir corpos hídricos, o óleo forma uma película superficial que impede a entrada de luz e a troca gasosa, reduzindo o oxigênio e prejudicando a vida aquática (Karpovich; Tumanova, 1988), estima-se que apenas um litro de óleo seja capaz de contaminar 25 mil litros de águas (Biscaro *et al.*, 2019).

No solo, o resíduo causa impermeabilização, dificultando a infiltração da água e favorecendo alagamentos (Abdollahzadeh *et al*., 2022). Além disso, sua decomposição anaeróbica, seja no mar ou em aterros sanitários, libera gases de efeito estufa como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e óxidos de nitrogênio, agravando as mudanças climáticas (Pereira *et al*., 2014; Oliveira G.; Rodrigues *et al*., 2022). Esse cenário é agravado pelo comportamento cotidiano em lares e indústrias, onde o descarte inadequado em pias, vasos sanitários ou no lixo comum é recorrente, motivado principalmente pela falta de conscientização da população (Kunzler; Schirmann, 2011).

No estado do Rio de Janeiro, o consumo anual de óleo vegetal é estimado em 95 milhões de litros. Caso esse volume fosse despejado integralmente em cursos d'água, o potencial de contaminação seria da ordem de 2,375 trilhões de litros. Essa estimativa de consumo é utilizada no cálculo do ICMS Ecológico, política pública criada pela Lei Estadual n° 5.100/2007, cujo fator de cálculo é dado pela multiplicação da população municipal pelo coeficiente de 0,5 litro mensal (Fundação CEPERJ, 2025).

Com o Decreto n° 44.543/2013, os óleos comestíveis foram incorporados ao ICMS Verde (ICMS Ecológico), compondo o Índice de Destinação Final de Resíduos Sólidos Urbanos (IDLi). Dentro desse escopo, o fator de óleo vegetal (Fator OV) foi responsável por repassar quase 1% do total do ICMS Ecológico distribuído no estado em 2024.

A operacionalização desse incentivo segue um ciclo cronológico rigoroso: os dados são registrados no **Ano de Coleta (AD)**, validados no **Ano Base** (envio/publicação) e, finalmente, convertidos em recursos no **Ano de Repasse (AF)**. Esse modelo é

estratégico pois transmutou a gestão do óleo residual de um passivo ambiental em um **ativo financeiro** para as administrações municipais. Entretanto, a persistente lacuna entre o potencial poluidor e os índices de reciclagem demanda uma análise crítica sobre a eficácia dessas políticas. Logo, este estudo tem por objetivo analisar o impacto e evolução do óleo vegetal nesse mecanismo de incentivo fiscal, bem como avaliar os resultados obtidos pelos municípios do estado do Rio de Janeiro a partir de sua implementação, em 2013.

Materiais e Métodos

A presente pesquisa estruturou-se em três etapas interdependentes: pesquisa bibliográfica e normativa, coleta de dados institucionais e análise estatístico-financeira.

Levantamento Normativo e Base Teórica

A fundamentação teórica baseou-se na análise da evolução legal do ICMS Ecológico no Estado do Rio de Janeiro. A introdução deste mecanismo pela Lei nº 5.100/2007 é resultado de uma evolução normativa originada na Constituição Federal de 1988 (Art. 158, Parágrafo Único) e na Lei Complementar Federal nº 63/1990, que regulamentam o repasse de 25% da arrecadação do ICMS aos municípios. No âmbito estadual, embora a Lei nº 2.664/1996 tenha definido inicialmente os critérios de rateio, foi somente com a Lei nº 5.100/2007 que o critério ambiental foi inserido. Atualmente, dos 25% repassados aos municípios, 2,5% são distribuídos com base na conservação ambiental, contemplando a implantação de unidades de conservação, a qualidade dos recursos hídricos e a gestão adequada de resíduos sólidos (Rio de Janeiro, 1996).

Essa inovação materializa o princípio do protetor-recebedor, compensando financeiramente o ente municipal que investe na proteção de bens ambientais (Ribeiro, 1999; Júnior *et al*., 2007). Dentro desse escopo, foram examinados os marcos regulatórios do Fator de Óleo Vegetal (Fator OV). O Índice de Destinação Final de Resíduos Sólidos Urbanos (IDLi) foi estabelecido pelo Decreto nº 43.284/2011, definido pela Equação 1:

$$IDLi = (TD + FA) + (CS + Dom + Sol) + Co \quad (1)$$

Onde: *TD* é tipo de destinação, *FA* é fator adicional, *CS* é fator de eficiência em coleta seletiva, *Dom* é fator de abrangência, *Sol* é Fator de coleta seletiva solidária e *Co* é fator de consórcio intermunicipal.

Com o Decreto nº 44.543/2013, o indicador foi atualizado para Índice de Destinação de Resíduos (IDR), incorporando formalmente o Fator OV, conforme mantido pelo vigente Decreto nº 46.884/2019 na Equação 2:

$$IDR = (TD + FA) + (FR + Dom + Sol) + Co + OV \quad (2)$$

Onde: *TD* é tipo de destinação, *FA* é fator adicional, *FR* é fator de reciclagem, *Dom* é fator de abrangência, *Sol* é Fator de coleta seletiva solidária, *Co* é fator de consórcio intermunicipal e *OV* é fator de óleo vegetal.

Quanto à natureza do material, a classificação seguiu a norma ABNT NBR 10004, que define o óleo vegetal como resíduo Classe II B (Inerte), material que não sofre transformações físicas, químicas ou biológicas em contato com água, mantendo-se inalterado por longo período. Complementarmente, utilizaram-se os parâmetros de rastreabilidade (MTR e CDF) definidos pela Nota Técnica do INEA (2025) e pelas diretrizes da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade (SEAS).

Além disso, este fator obedece a uma classificação de 0 a 3 pontos adicionais no IDR com o Fator OV recebidos por cada município. A pontuação referente à Faixa de Percentual de Coleta de Óleo (FC) é definida da seguinte forma: atribui-se 0 quando o FC está entre 0% e 1%, 1 quando está entre 1% e 2%, 2 quando está entre 2% e 3%, e 3 quando o FC é superior a 3%.

Procedimentos de Repasse e Coleta de Dados

A investigação compreendeu o fluxo financeiro gerido pela Fundação CEPERJ e pela SEFAZ-RJ. O cálculo do repasse aos municípios destina 2,5% do montante total do ICMS aos critérios ambientais, consolidados no Índice Final de Conservação Ambiental (IFCA). Para fins de precisão na análise da proporcionalidade do Fator OV, optou-se por desconsiderar o Índice de Qualidade do Sistema Municipal de Meio Ambiente (IQSMMA), uma vez que este atua apenas como mecanismo de redistribuição de bonificação e não altera o montante total destinado ao resíduo.

Os dados quantitativos foram extraídos dos bancos de dados da Fundação CEPERJ (coleta de óleo vegetal entre os anos-base 2013 e 2022) e da SEFAZ-RJ (repasses financeiros dos anos fiscais 2015 a 2024).

Análise dos Dados e Processamento Matemático

Os dados foram tabulados e processados em software de planilha eletrônica, relacionando o descarte estimado, a coleta informada e a coleta comprovada por município. A pontuação do Fator OV foi analisada em escalas de 0 a 3, baseada no percentual de coleta municipal (FC). Por fim, o valor financeiro direcionado especificamente ao óleo vegetal foi calculado isolando-se a participação deste indicador dentro dos 20% do ICMS Ecológico (Decreto nº 46.884, 2019) que compõem a parcela de Resíduos Sólidos, utilizando-se a relação:

$$\$RSU \times (OV \div IDR)$$

Onde: *$RSU* é repasse de ICMS-E/RJ para os resíduos sólidos, *OV* é fator de óleo vegetal e *IDR* é índice de destinação de resíduos

Resultados e Discussões

Na Figura 01 são apresentados todos os repasses financeiros, entre os anos fiscais 2015 e 2024, relativos ao Fator OV de cada município. Quando zerado (em vermelho), significa que não houve coleta comprovada pelo sistema MTR. Diante desse cenário, o presente trabalho propõe uma análise dos impactos econômicos e ambientais decorrentes da inclusão do Fator OV.

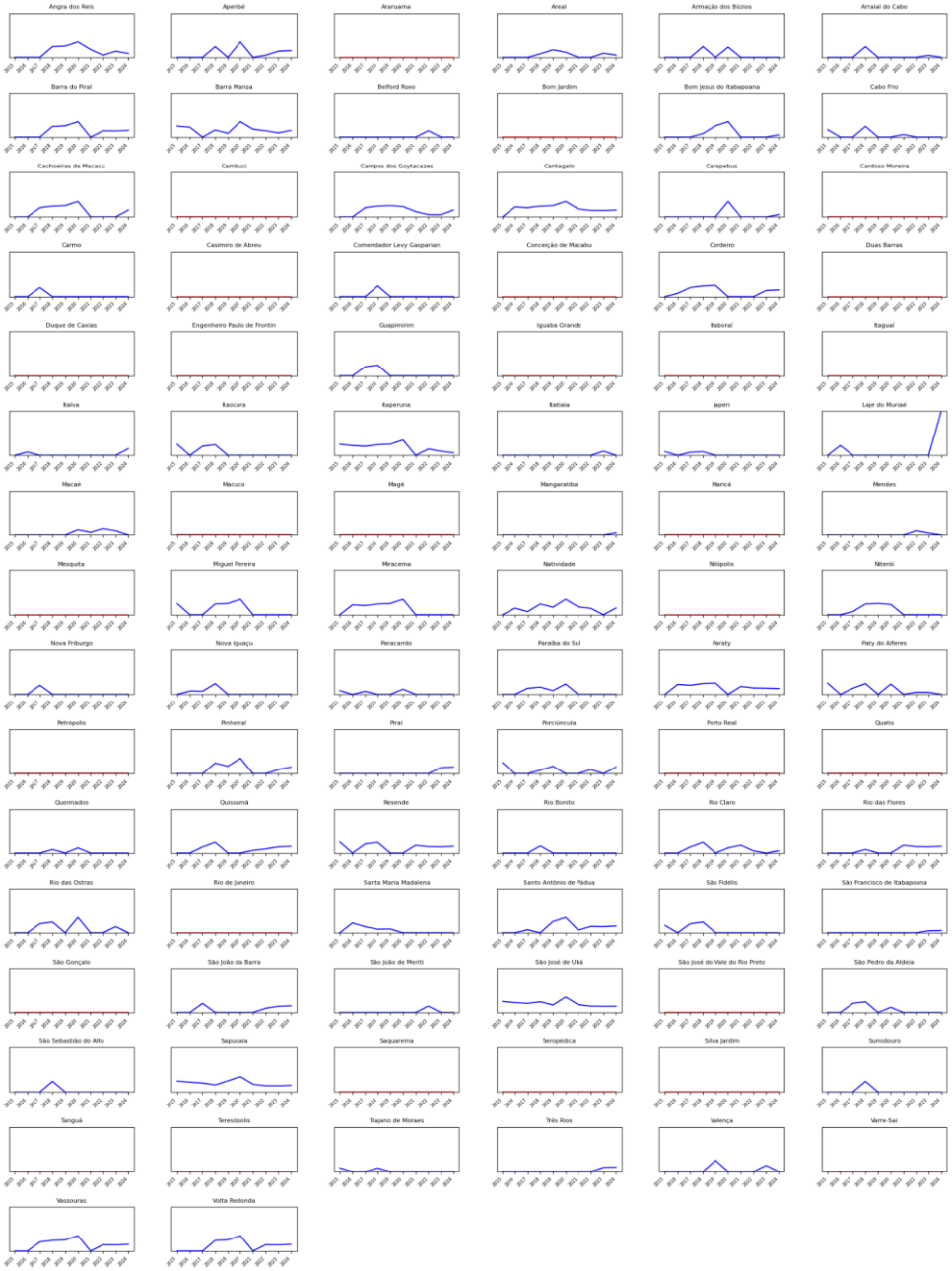


Figura 01: Repasses financeiros de OV realizados ao longo da série histórica.
Fonte: elaborado pelos autores com dados da Fundação CEPERJ (2025).

Aspectos Econômicos

Do AF2015 ao AF2024, os repasses direcionados ao Fator OV somaram mais de R$30 milhões, demonstrando a importância financeira do Fator OV para os municípios. Partindo deste panorama, os 10 municípios que mais arrecadaram com coleta de OV neste período estão representados no Gráfico 01, apresentando o valor total arrecadado e o número de vezes que participaram da coleta de OV em seus territórios.

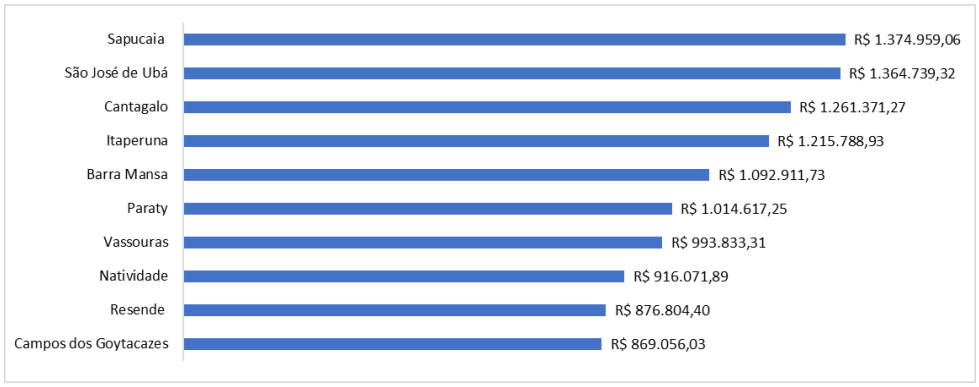


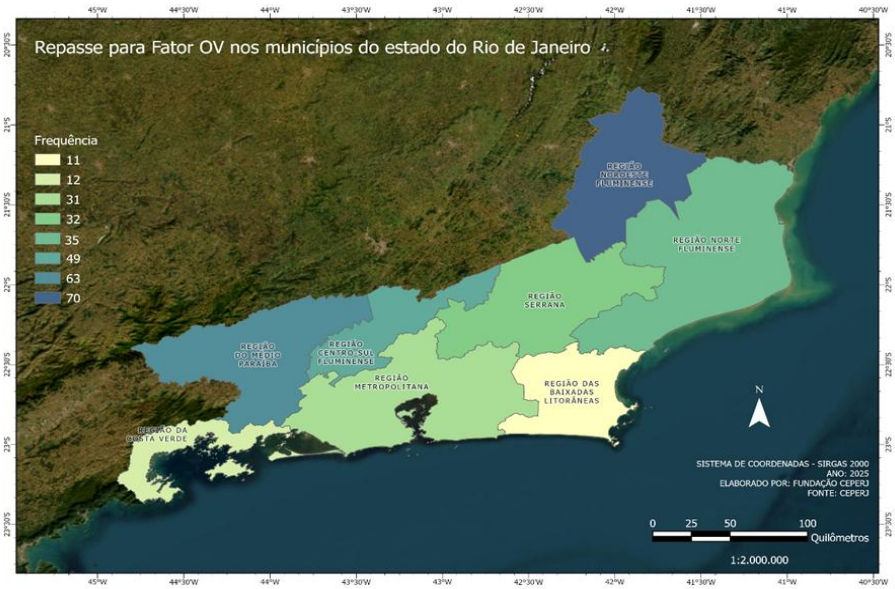
Gráfico 01: Ranking dos Municípios com Maior Repasse em OV
Fonte: elaborado pelos autores com dados da Fundação CEPERJ (2025).

No ranking acima, os 10 primeiros municípios arrecadaram mais de R$11 milhões, equivalente a 36% do total repassado no estado dentro na série histórica. Ao longo dos 10 anos de repasse ao Fator OV, Sapucaia e São José de Ubá arrecadaram continuamente; ou seja, mantiveram-se comprometidos com a coleta de OV desde o estabelecimento do Decreto 44.543/2013. Em contrapartida, os outros municípios do top 10 participaram entre 7 e 9 vezes.

Aspectos ambientais

Desde 2013, dos 92 municípios que constituem o território do Rio de Janeiro, 63 participaram da coleta do Fator OV, que correspondem a 68,5% do total e 29 (31,5%) nunca participaram, que corresponde a 31,5% do total. Logo, mesmo após dez anos de implementação da política pública, muitos municípios do Estado ainda não aplicaram o serviço de coleta de óleo vegetal em seus territórios (CEPERJ, 2025).

O Mapa 1 abaixo representa a relação entre os municípios nas regiões geográficas do Rio de Janeiro e a frequência total de coleta de óleo vegetal na série histórica de 12 anos de política por meio de um gradiente de cores: quanto mais escura a tonalidade, maior o número de participações municipais, e quanto mais clara, menor o número de participais dos municípios. Sendo assim, as regiões com mais municípios, teoricamente, têm a possibilidade de apresentar frequências maiores. A região do Noroeste Fluminense, com 13 municípios o que corresponde 14% dos municípios estaduais, foi a que mais se destacou pela frequência de 70 participações, tendo o município de São José de Ubá apresentado coleta em todos os anos da análise, bem como Sapucaia na região do Sul-Fluminense. Por fim, dos 63 participantes totais, nove municípios apresentaram apenas uma participação na série histórica, são eles: Belford Roxo, Cardoso Moreira, Itatiaia, Petrópolis, Quatis, Rio Bonito, São João de Meriti e São Sebastião do Alto.



Mapa 01: Frequência da Coleta Municipal de OV por Região de Governo do ERJ.
Fonte: elaborado pelos autores com dados da Fundação CEPERJ (2025).

Dando sequência, outra análise submetida por este trabalho é a comparação da quantidade de óleo comestível coletada, comprovada pelo sistema MTR, versus a quantidade estimada de descarte (Gráfico 4).

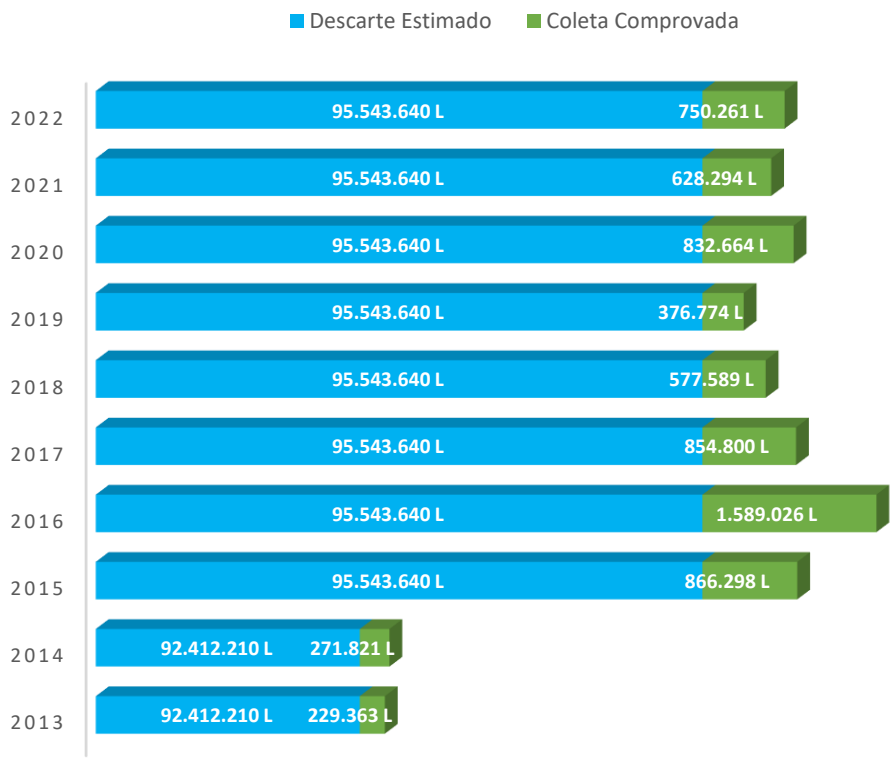


Gráfico 04: Coleta de OV *versus* Descarte Estimado de OV.
Fonte: elaborado pelos autores com dados da Fundação CEPERJ (2025).

Para a quantidade estimada de descarte é estabelecida uma média do consumo de 0,5L/pessoa (INEA, 2025) com a quantidade de habitantes do Estado do Rio de Janeiro, dado do último censo de 2016, usado para calcular esta estimativa. Dessa forma, o descarte estimado foi de 92.412.210 milhões de Litros nos anos de 2013 e 2014, e se manteve a partir de 2015 em 95.543.640 milhões de litros anuais.

Nota-se que o Gráfico 5 demonstra o percentual de reciclagem, abrangendo a porcentagem de coleta comprovada do estado ao longo dos anos, a partir da soma de litros coletados anualmente de cada um dos municípios participantes. Assim, calculou-se a reciclagem em percentual a partir da quantidade coletada e a quantidade estimada de descarte. Logo, 2024 foi o ano com a maior quantidade de óleo coletada com 2.009.536 milhões de Litros, correspondendo assim, a 2,09%. Enquanto, nos anos de 2013 e 2014 os valores de OV coletados comprovados foram abaixo de 300 mil litros, que compreende aos menores valores dentro do período avaliado, respectivamente, 0,25% e 0,29%.

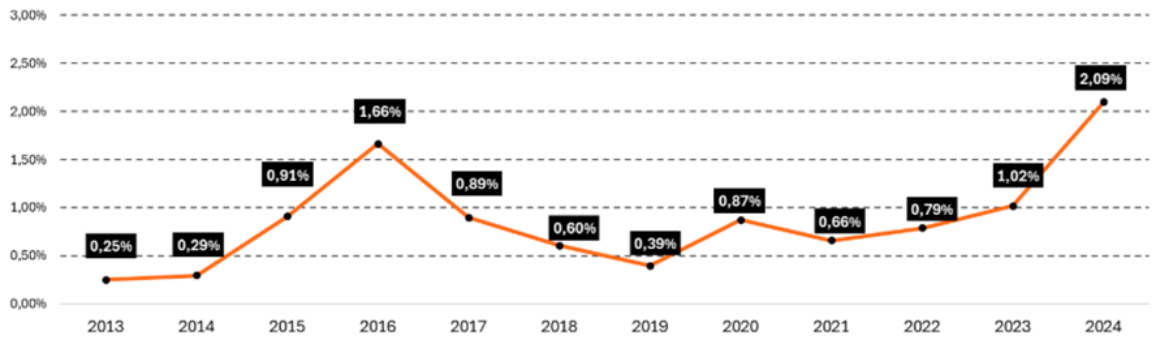


Gráfico 05: Percentual de Reciclagem
Fonte: elaborado pelos autores com dados da Fundação CEPERJ (2025).

Diante desse cenário, dos 68 municípios 56 atingiram pontuação máxima 3 no Fator OV; ou seja, com percentual de coleta de OV igual ou superior a 3%, mas nenhum participou todos os anos. A pontuação máxima teve uma frequência de 11 vezes neste período. Nesse sentido, São José de Ubá e Sapucaia seguem liderando. Com 9 a 8 vezes de comprovação estão os municípios de Barra Mansa, Cantagalo, Itaperuna, Natividade, Campos dos Goytacazes e Paraty. Por outro lado, observa-se um número significativo de municípios com baixa frequência de comprovação, entre 1 e 4 anos. Entre eles estão São Fidélis, Paracambi, Nova Iguaçu, Japeri, Cabo Frio, São Pedro da Aldeia, Itaboraí, Maricá, Arraial do Cabo, Itaguaí, Magé, Nilópolis e

São João de Meriti. Destacam-se ainda municípios com apenas 1 ano de comprovação, como Belford Roxo, Carmo, Mangaratiba, Italva, Comendador Levy Gasparian, Nova Friburgo, Rio Bonito, Sumidouro e São Sebastião do Alto.

O repasse de RSU depende dos fatores que compõem o IDR. Em algumas situações, os municípios podem pontuar somente em OV e, nesse sentido, os municípios em que isto ocorreu ao longo dos 12 anos em análise, assim como a frequência de ocorrência. Os municípios de Armação dos Búzios e Comendador Levy Gasparian foram bonificados em RSU somente por coleta de OV, com a frequência de 3 anos e 2 anos, respectivamente. E observa-se que os demais municípios (Angra dos Reis, Araruama, Barra Mansa, Belford Roxo, Bom Jardim, Cabo) apresentaram 1 ano de bonificação.

Este repasse de RSU exclusivamente para OV se repetiu 14 vezes ao longo da série histórica, reforçando a importância do $OV para os municípios quando não pontuam em outros fatores do IDR. E conforme o Gráfico 8, a frequência anual de OV igual a 100% de IDR ocorreu em 2020, com 50% de todas os casos da série histórica analisada. Foi analisado, durante a série histórica, os municípios que só pontuaram em Fator OV no IDR, com o destaque para os anos de 2020, 2018, 2023, 2022 e 2019, em ordem decrescente.

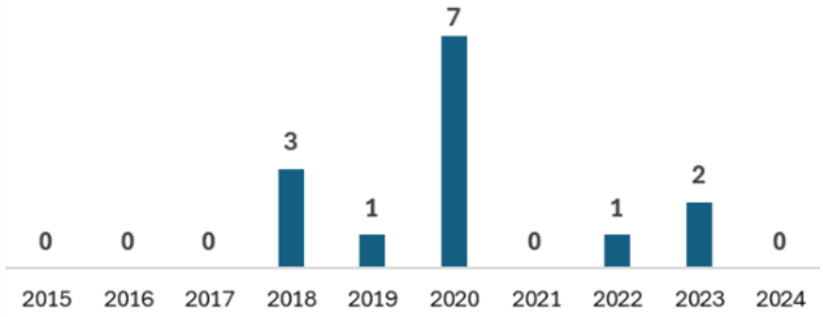


Gráfico 08: Frequência Anual de Municípios com Fator OV sendo 100% do IDR
Fonte: elaborado pelos autores com dados da Fundação CEPERJ (2025).

Limitações do Fator OV

Como discutido anteriormente neste trabalho, o indicador estabelecido pelo Decreto 44.543/2013, que insere o Fator OV no cálculo do índice do IDR, apresenta algumas limitações. Primeiramente, ele considera apenas a coleta de óleo vegetal registrada no sistema MTR, o qual valida exclusivamente coletas realizadas via CNPJ. Com isso, a coleta de óleo de origem domiciliar acaba sendo desconsiderada. Essa limitação demonstra uma controvérsia, pois a estimativa do ICMS Ecológico projeta o consumo médio de óleo com base no total de habitantes do território.

São apresentados os registros dos municípios, ao longo da série histórica de 2013-2024, em diferentes faixas percentuais de coleta de OV. Os dados da série histórica entre 2013 e 2024 confirmam esse cenário de baixa adesão e dificuldade de atingir as metas, entende-se que 71,01% das pontuações foram de zero, tendo a maior parte dos municípios ausente de qualquer coleta (ano), representando 62,05%. Em doze anos, houve apenas dois casos isolados de coleta igual ou superior a 100%: o município de Carmo, em 2015, e Cachoeiras de Macacu, em 2024, que atingiu 253,38%, ultrapassando a quantidade estimada. Nota-se que muitos municípios realizam esforços pequenos e acabam não tendo reconhecimento financeiro, como Rio Claro que coletou 0,98% de óleo vegetal em 2023, mas não recebeu bonificação.

Ao que se demonstrou neste trabalho, o ICMS Ecológico se apresenta mais como um incentivo financeiro do que ambiental devido a limitação de 3% de coleta de óleo (FC) e, principalmente, pela coleta se dar através de CNPJ, excluindo a principal fonte residual. Esse critério restringe a contabilização às cadeias formais, de forma a evidenciar mais a operacionalização e da coleta do que de fato a redução do descarte inadequado de óleo vegetal.

Considerações finais

A partir das análises levantadas neste trabalho, pôde-se entender mais sobre os repasses, as porcentagens de reciclagem do Fator OV e investigar sobre os resultados obtidos pelos municípios. Dessa forma, desde 2013, foram repassados R$ 30.620.591,46 milhões devido ao Fator OV nos repasses de ICMS Ecológico totais, em que o AF de maior repasse foi 2018, com R$ 6.156.601,24. Soma-se então 9.956.559 milhões de litros de óleo coletados, do AF 2015 até 2024.

Desde a implementação do Fator OV ao IDR, 63 municípios já participaram da coleta, enquanto 29 nunca participaram, chegando assim às porcentagens de 68,5% a 31,5% respectivamente, em relação a adesão à coleta de óleos comestíveis. O município com melhor desempenho foi Sapucaia totalizando o repasse de Fator OV acumulado de R$ 1.362.632.65 milhão, participando com a frequência total de 12 anos de coleta, este pertencente a Região Centro-Sul Fluminense.

É essencial ressaltar que, sob a ótica ambiental, a participação de todos os municípios no Fator OV é de grande importância, considerando os impactos negativos do descarte inadequado do óleo vegetal comestível. No entanto, segundo a metodologia de repasse do ICMS Ecológico, quanto maior o número de municípios que atendem aos critérios, menor é o valor individual recebido por todos os municípios. Isso gera uma situação de conflito entre os interesses ambientais, que demandam ampla participação, e os financeiros, que favorecem menor concorrência pelos recursos.

Finalmente, entende-se que a coleta e destinação adequada do óleo vegetal usado ainda não são em totalidade explorados pelas cidades fluminenses. A falta de adesão em parte dos municípios à política compromete o potencial ambiental e econômico

dessa iniciativa, que se provou lucrativa e impactante ao meio ambiente. A implementação do Fator OV na política do ICMS ecológico no Estado do Rio de Janeiro desde 2013, tem sido uma medida fundamental para aumentar o foco sobre esse resíduo. Logo, é fundamental ampliar a participação municipal e fortalecer parcerias entre o poder público e o setor privado, a fim de consolidar uma gestão mais sustentável e eficiente do óleo consumido em residências e estabelecimentos, dando destaque ao recolhimento desse resíduo e ao descarte ambientalmente correto.

Referências Bibliográficas

ABDOLLAHZADEH, H.; FATAHI, Y.; KHABBAZ, H. Geotechnical properties of oil-polluted soil: a review. Environmental Science and Pollution Research, v. 29, p. 27545–27561, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 10004:2004 – Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Disponível em: <https://analiticaqmcresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2025.

BISCARO, M. A. S. et al. Feasibility of Frying Oil After Treatment by a Biofuel Company in Manaus - Amazonas. Jornal Internacional para Educação e Pesquisa em Inovação. Vol: -7 No11, Editora e Fundação Internacional de Pesquisa Educativa, 2019.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Art. 158, Parágrafo Único.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – Ibama. Instrução Normativa nº 13, de 18 de dezembro de 2012. Publica a Lista Brasileira de Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=128945>. Acesso em: 12 dez. 2025.

BRASIL. Lei Complementar nº 63, de 11 de janeiro de 1990. Dispõe sobre critérios e prazos de crédito das parcelas do produto da arrecadação de impostos de competência dos Estados e de transferências por estes recebidas, pertencentes aos Municípios.

EMBRAPA. Dados econômicos – soja. Embrapa Soja, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 22 jul. 2025.

FILHO, S. et al. Efeitos associados ao descarte inadequado do óleo vegetal residual nas propriedades físico-químicas do solo. Natural Resources, v. 10, n. 3, p. 25–37, 2020. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/naturalresources/article/view/CBPC2237-9290.2020.003.0004>. Acesso em: 4 fev. 2020.

FUNDAÇÃO CEPERJ. Boletim 1 – ICMS Ecológico em 10 anos: avanços da qualidade ambiental no estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: CEPERJ, 2020. p. 22–23. Disponível em: <https://www.rj.gov.br/ceperj/sites/default/files/arquivos-paginas/Boletim-1-ICMS-Ecologico-1.pdf>. Acesso em: 7 out. 2025.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. SEAS; INEA. Nota técnica: ICMS Ecológico do Estado do Rio de Janeiro – 2021. Rio de Janeiro: SEAS/INEA, 2021. Disponível em: <https://www.rj.gov.br/ceperj/sites/default/files/arquivos-paginas/NOTA-TECNICA-SEAS-INEA-ICMS-ECOLOGICO-DO-ESTADO-DO-RIO-DE-JANEIRO-2021.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2025.

JÚNIOR, A. M. N.; SALM, J. F.; MENEGASSO, M. E. Estratégias e ações para a implementação do ICMS ecológico por meio da co-produção do bem público. Revista de Negócios, v. 12, n. 3, p. 62–73, 2007. Disponível em: http://proxy.furb.br/ojs/index.php/rn/article/view/632/558. Acesso em: 2 dez. 2025.

KARPOVICH, R. N.; TUMANOVA, T. A. The effect of oil films on water evaporation and oxygen content in sea water. GeoJournal, v. 16, p. 445–448, 1988.

KUNZLER, A. A.; SCHIRMANN, Angélica. Proposta de reciclagem para óleos residuais de cozinha a partir da fabricação de sabão. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2011.

OLIVEIRA, C. M. R.; ANDRADE, P. C. A.; SANTOS, M. S. F. Análise dos pontos de coleta do óleo vegetal residual no Brasil para a logística reversa. Sustentabilidade, Campinas, v. 3, e225830, 2022. Disponível em: <https://periodicos.puc-campinas.edu.br/sustentabilidade/article/view/5830/4789>. Acesso em: 2 set. 2025.

OLIVEIRA, G.; RODRIGUES, F. et al. Gestão de resíduos oleosos e implicações ambientais. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, v. 3, n. 5, p. 1–12, 2022.

PEREIRA, A. F. S.; SANTOS, C. C. O.; ZUKOWSKY TAVARES, C.; RAYMUNDO, V. M. S. Conscientização e educação na escola pública: o descarte indevido do óleo e seus efeitos no meio ambiente. Revbea – Revista Brasileira de Educação Ambiental, v. 9, n. 1, p. 102–115, 2014. Disponível em: <https://periodicos.unifesp.br/index.php/revbea/article/download/1844/1255>. Acesso em: 1 jul. 2025.

RIBEIRO, M. A. O princípio do protetor-recebedor. In: WORKSHOP DESENVOLVIMENTO E CONSERVAÇÃO ATRAVÉS DO USO DO SOLO: identificando os incentivos corretos, 1999, Palmas. Anais […]. Palmas, 1999.

RIO DE JANEIRO. Decreto Estadual nº 44.543, de 26 de dezembro de 2013. Altera o Anexo III do Decreto nº 41.844, de 4 de dezembro de 2009, que dispõe sobre o cálculo dos índices relativos à gestão dos resíduos sólidos, e revoga o art. 2º do Decreto nº 43.284, de 10 de novembro de 2011. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 26 dez. 2013. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/rj/decreto-n-44543-2013-rio-de-janeiro-altera-o-anexo-iii-do-decreto-41844-2009-que-dispoe-sobre-calculo-dos-indices-relativos-a-gestao-dos-residuos-solidos-e-revoga-o-artigo-art-2%C2%BA-do-decreto-43-284-de-10-de-novembro-de-2011>. Acesso em: 16 dez. 2025

RIO DE JANEIRO. Decreto Estadual nº 46.884, de 19 de dezembro de 2019. Estabelece definições técnicas para alocação do percentual a ser distribuído aos municípios em função do ICMS Ecológico. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 19 dez. 2019. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/rj/decreto-n-46884-2019-rio-de-janeiro-estabelece-definicoes-tecnicas-para-alocacao-do-percentual-a-ser-distribuido-aos-municipios-em-funcao-do-icms-ecologico>. Acesso em: 16 dez. 2025.

RIO DE JANEIRO. Lei Estadual nº 2.664, de 27 de dezembro de 1996. Dispõe sobre a distribuição aos municípios de parcela de 25% do produto da arrecadação do ICMS.

RIO DE JANEIRO. Lei Estadual nº 5.100, de 4 de outubro de 2007. Cria o ICMS Ecológico e altera a Lei nº 2.664/1996.

SANTOS, A. C. et al. Estudo prospectivo de óleos vegetais. Brasília, DF. Embrapa Agroenergia, 2022. (Documentos, n. 41). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1140622/1/-DOC41.pdf>. Acesso em: 2 set. 2025.

SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE; INEA. Nota técnica – ICMS Ecológico do Estado do Rio de Janeiro 2023. Rio de Janeiro: SEAS/INEA, 2023. Disponível em: <https://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2023/04/NOTA-TÉCNICA-ICMS-ECOLÓGICO-2023-SEAS-INEA-REVISADA.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2025.

SECRETARIA DE ESTADO DE FAZENDA DO RIO DE JANEIRO (SEFAZ/RJ). Dados administrativos internos não publicados. Rio de Janeiro, 2024.

TAMOTHRAN, A. M. et al. The degradation and toxicity of commercially traded vegetable oils following spills in aquatic environment. Environmental Research, v. 214, n. 113985, nov. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935122013123>. Acesso em: 12 mar. 2025.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. Oilseeds: world markets and trade. Washington, DC, 2021. Disponível em:< https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2025.

ZHOU, Y. et al. Investigation of used cooking oil on the formation of FOG deposits in sewer line clogging. Environmental Science and Pollution Research, v. 29, p. 1–13, 2022.

GLOSSÁRIO

ABNT NBR 10004: Norma brasileira que classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública.

PRINCIPAIS IMPACTOS DE USINAS FOTOVOLTAICAS E SUAS IMPLICAÇÕES PARA A AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL: UMA REVISÃO DE LITERATURA

1 Francisco Ícaro Carvalho Aderaldo, 2 Elias do Nascimento de Sousa Filho, 3 Jeferson Botelho Rodrigues, 4 Pedro Ítalo Carvalho Aderaldo, 5 Tiago de Abreu Lima

1 Universidade de São Paulo, icaroaderaldo16@gmail.com; 2 Instituto Federal do Ceará, eliasnfilho@gmail.com; 3 Universidade de São Paulo, jefersonbotelho@usp.br; 4 Universidade de Pernambuco, pedroitaloo@hotmail.com; 5 Universidade Federal do Ceará, tiago.abrlm@gmail.com.

Palavras-chave: Avaliação de Impacto Ambiental; Usinas Fotovoltaicas; Impactos Ambientais; Estudo de Impacto Ambiental; Efetividade.

Resumo

Este artigo tem por objetivo identificar os principais impactos ambientais associados às Usinas Fotovoltaicas (UFV) reportados na literatura científica e discutir suas implicações para a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) no contexto do Licenciamento Ambiental (LA). Trata-se de revisão bibliográfica qualitativa, de caráter exploratório e interpretativo, desenvolvida com base em publicações selecionadas no período de 2016 a 2025. A análise foi organizada em três eixos, correspondentes aos meios físico, biótico e antrópico, com vistas à sistematização dos impactos mais recorrentes e à reflexão sobre sua relevância para os estudos ambientais que subsidiam a decisão administrativa. Os resultados evidenciam a recorrência de impactos relacionados à alteração do uso e cobertura da terra, supressão vegetal, compactação do solo, erosão, emissão de poeira, interferências na fauna, perda e fragmentação de habitats, alterações paisagísticas, conflitos pelo uso do território e repercussões socioeconômicas locais. Observou-se, ainda, que a literatura tem incorporado impactos indiretos, cumulativos e emergentes que ampliam o escopo analítico exigido da AIA. Conclui-se que a efetividade da AIA aplicada a usinas fotovoltaicas depende da qualidade dos diagnósticos, da integração entre os meios analisados e da capacidade de incorporar, de forma tecnicamente consistente, impactos já reconhecidos pela literatura, de modo a qualificar o LA e a tomada de decisão pública.

Introdução

A expansão da geração de energia solar fotovoltaica tem assumido posição estratégica no contexto da transição energética contemporânea, sobretudo em razão da necessidade de diversificação da matriz elétrica e da redução das emissões de gases de efeito estufa. No caso brasileiro, esse processo tem sido impulsionado por um conjunto de fatores favoráveis, entre os quais se destacam a elevada disponibilidade de radiação solar, a redução progressiva dos custos tecnológicos e o avanço de políticas de incentivo ao setor, favorecendo a multiplicação de empreendimentos de diferentes portes em distintas regiões do país (David; Souza; Rizol, 2024; Oliveira; Filho 2021; Pereira et al., 2017; Tabarelli et al., 2018).

Ainda que a energia solar costume ser associada à ideia de fonte limpa, essa característica não elimina a ocorrência de impactos ambientais decorrentes da implantação, operação e desativação das usinas fotovoltaicas (UFV) (Hulst et al., 2020; Peña-Guzmán et al., 2019). A literatura especializada tem demonstrado que tais empreendimentos podem provocar alterações relevantes sobre o território e seus componentes ambientais, envolvendo ocupação extensiva do solo, supressão da cobertura vegetal, movimentação de terras, instalação de estruturas de apoio e geração de resíduos ao final da vida útil dos sistemas (Tawalbeh, 2021). Nessa perspectiva, a baixa emissão operacional de carbono não pode ser tomada como sinônimo de ausência de impactos, tampouco como evidência suficiente de sustentabilidade ambiental.

A complexidade dessas interações torna especialmente relevante o papel da Avaliação de Impacto Ambiental (AIA). Vinculada ao licenciamento ambiental, a AIA constitui importante instrumento de antecipação, identificação, previsão e interpretação de impactos, subsidiando a tomada de decisão por meio de estudos como o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e seu respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) (Morrison-Saunders; Retief, 2014; Fischer, 2014). Sua contribuição ultrapassa a simples enumeração de efeitos esperados, abrangendo também a análise de alternativas locacionais e tecnológicas, a proposição de medidas mitigadoras, compensatórias e de monitoramento, bem como a qualificação técnica da decisão administrativa (Fischer; Noble, 2015; Veronez, 2018). Nesse sentido, Aversa e Montaño (2019), e Veronez (2018), observam que, no contexto brasileiro, a qualidade dos estudos ambientais influencia diretamente a capacidade do poder público de reconhecer fragilidades territoriais e estabelecer exigências compatíveis com os riscos associados ao empreendimento.

Entretanto, a contribuição efetiva da AIA depende da qualidade com que os impactos são reconhecidos, descritos, interpretados e incorporados aos estudos que fundamentam o licenciamento. Quando determinados efeitos já discutidos de forma recorrente pela literatura científica não aparecem, ou aparecem de maneira insuficiente, superficial ou fragmentada nos estudos ambientais, estabelece-se uma lacuna entre o conhecimento técnico disponível e sua incorporação prática na decisão pública. Essa dissociação tende a comprometer a robustez analítica do EIA e do RIMA e, por consequência, pode fragilizar a capacidade do sistema de AIA de orientar, de forma consistente, a implantação ambientalmente adequada dos empreendimentos (Moon, 1998; Morgan, 2012).

Essa questão torna-se especialmente sensível no caso das UFV, cuja expansão recente vem sendo acompanhada pela ampliação do debate científico sobre seus efeitos territoriais, ecológicos e sociais. Chen (2024), em metanálise sobre os efeitos ecológicos de UFV, demonstram que a magnitude e a natureza dos impactos variam conforme fatores como escala da planta, sensibilidade ambiental da área, histórico de uso da terra e manejo adotado durante a operação. Do mesmo modo, Zarzavilla (2022) e Rabaia (2021) ressaltam que os impactos não se distribuem de forma homogênea, incidindo de maneira articulada sobre o meio físico, o meio biótico e o meio antrópico, o que exige abordagens integradas e analiticamente consistentes por parte dos instrumentos de avaliação ambiental.

Nessa direção, o levantamento sistemático dos impactos ambientais mais recorrentes reportados pela literatura científica pode oferecer contribuição relevante para o aprimoramento da análise ambiental aplicada ao setor fotovoltaico. Isso porque a identificação dos efeitos mais frequentemente mencionados não apenas permite compreender a amplitude das interações entre empreendimento e ambiente, mas também fornece parâmetros concretos para refletir sobre a suficiência dos conteúdos abordados nos estudos de impacto e sobre a capacidade do sistema de AIA de responder adequadamente às exigências dessa tipologia de projeto. Em outras palavras, se a literatura já reconhece impactos relevantes associados às UFV, a sua não incorporação, ou incorporação insuficiente, nos estudos que subsidiam o licenciamento pode indicar fragilidades na prática avaliativa e comprometer a qualidade da tomada de decisão.

É nesse marco que se insere o presente artigo. O trabalho parte do levantamento dos principais impactos ambientais mencionados na literatura científica sobre UFV, considerando publicações do período analisado e organizando os resultados conforme sua incidência sobre o meio físico, o meio biótico e o meio antrópico. A partir dessa sistematização, busca-se discutir de que maneira esses impactos se relacionam entre si e em que medida sua consideração é relevante para a atuação do sistema de AIA, em sua articulação com o licenciamento ambiental (LA) e com o EIA/RIMA.

Dessa forma, o objetivo geral do estudo é identificar os principais impactos ambientais associados às UFV reportados na literatura científica no período analisado e discutir sua relevância para a efetividade do sistema de AIA no âmbito do LA. Como objetivos específicos, pretende-se levantar e sistematizar os impactos mais recorrentes mencionados na literatura, agrupando-os segundo os meios físico, biótico e antrópico; examinar as relações e interdependências entre esses grupos de impactos; e refletir, à luz desse levantamento, sobre como o sistema de AIA, operacionalizado por meio do LA e de seus respectivos estudos, incorpora, ou pode deixar de incorporar adequadamente, tais efeitos na análise e na decisão administrativa.

Ao adotar esse enfoque, o artigo não se limita a reunir exemplos de impactos atribuídos à geração solar fotovoltaica. Seu propósito é, sobretudo, contribuir para o debate sobre a qualidade e a suficiência da avaliação ambiental aplicada a essa tipologia de empreendimento, evidenciando que a efetividade da AIA depende não apenas da existência formal dos instrumentos, mas da capacidade concreta de esses instrumentos assimilarem, de modo abrangente e crítico, os impactos já reconhecidos pelo conhecimento científico. Assim, o estudo procura oferecer subsídios tanto para a sistematização do debate acadêmico quanto para o aprimoramento das práticas de avaliação e decisão no LA de UFV.

Material e métodos

Este estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica, de natureza qualitativa, com finalidade exploratória, descritiva e interpretativa. A opção por esse delineamento decorreu do objetivo de identificar, sistematizar e discutir os principais impactos ambientais associados às UFV reportados na literatura científica recente, bem como refletir sobre a relevância desses impactos para a atuação do sistema de AIA no âmbito do LA. Em vez de privilegiar uma abordagem estritamente quantitativa, buscou-se examinar padrões de recorrência, convergências temáticas e nexos analíticos entre os impactos identificados e a capacidade dos instrumentos avaliativos de contemplá-los de modo adequado.

A busca bibliográfica foi realizada nas bases Google Acadêmico, SciELO e PubMed, mediante combinações entre os descritores “avaliação de impacto ambiental”, “usinas fotovoltaicas”, “energia solar”, “licenciamento ambiental”, “environmental impact assessment”, “photovoltaic power plants”, “solar energy environmental impacts” e “EIA”. O recorte temporal adotado compreendeu o período de 2016 a 2025, de modo a abranger uma produção científica recente, marcada pela expansão acelerada do setor fotovoltaico e pela ampliação das discussões sobre seus efeitos ecológicos, territoriais e socioeconômicos.

Foram incluídos artigos completos, revisões de literatura e estudos aplicados que abordavam, de maneira direta, impactos ambientais ou socioeconômicos de UFV, processos de licenciamento, discussões sobre AIA ou aspectos relacionados ao ciclo de vida da tecnologia. Foram excluídos trabalhos centrados exclusivamente no desempenho elétrico dos painéis, em engenharia de componentes ou em simulações energéticas dissociadas da análise ambiental. Também não foram considerados textos sem acesso integral ou sem densidade analítica compatível com os objetivos do estudo.

Após a triagem por título, resumo e palavras-chave, os trabalhos selecionados foram submetidos à leitura integral. Em seguida, foi elaborado um quadro de fichamento contendo autoria, ano, objetivo, contexto da pesquisa, tipo de impacto abordado, fase do empreendimento considerada e principais contribuições para a discussão ambiental. Com base nesse procedimento, foi possível levantar os impactos mais recorrentes mencionados na literatura e agrupá-los conforme sua incidência predominante sobre o meio físico, o meio biótico e o meio antrópico.

A organização da análise apoiou-se, portanto, em três eixos. No meio físico, foram reunidas menções a alterações em solo, água, relevo, drenagem, atmosfera local, poeira, ruído, paisagem e microclima. No meio biótico, concentraram-se impactos sobre flora, fauna, habitats, conectividade ecológica e dinâmica ecossistêmica. No meio antrópico, foram agrupadas repercussões sobre uso do território, atividades produtivas, emprego, renda, percepção paisagística, saúde e conflitos sociais. Essa classificação guarda proximidade com a estrutura usual dos diagnósticos desenvolvidos em EIA/RIMA, favorecendo o diálogo entre a literatura revisada e a lógica operativa do LA, em consonância com Sánchez (2023) e Glasson e Therivel (2019).

Além do levantamento e da sistematização dos impactos, a revisão procurou compreender relações de causalidade, interdependência e encadeamento entre os efeitos identificados. Desse modo, os estudos foram lidos considerando não apenas a ocorrência isolada dos impactos, mas também suas conexões entre alterações físicas do território, respostas ecológicas e repercussões sociais. Tal procedimento dialoga com a compreensão de que a qualidade da AIA depende de leitura integrada e não compartimentalizada dos meios analisados, aspecto amplamente discutido por Sánchez (2023), Morgan (2012) e Bond, Morrison-Saunders e Howitt (2012).

Por fim, a discussão foi conduzida à luz do entendimento de que a efetividade da AIA não depende apenas de sua existência formal, mas da capacidade de seus instrumentos incorporarem, de maneira tecnicamente consistente, os impactos relevantes reconhecidos pelo conhecimento científico. Nessa perspectiva, a literatura levantada foi utilizada como inventário de efeitos, e também como base para refletir sobre possíveis lacunas analíticas nos estudos ambientais exigidos no licenciamento, especialmente diante da emergência de novos temas e de impactos ainda pouco incorporados nas práticas avaliativas, conforme discutem Sadler (1996), Ribeiro et al. (2021) e Jiricka-Pürrer et al. (2018).

Resultados e discussão

A revisão bibliográfica evidenciou que a literatura científica sobre UFV registra um conjunto amplo e diversificado de impactos ambientais, distribuídos de forma articulada entre os meios físico, biótico e antrópico. O levantamento realizado permitiu identificar 68 impactos mencionados para o meio físico, 90 para o meio biótico e 86 para o meio antrópico. Esse resultado demonstra que, embora a energia solar fotovoltaica seja amplamente associada à transição energética e à redução de emissões, sua implantação e operação não se desvinculam de alterações ambientais relevantes, cuja compreensão exige abordagens analíticas abrangentes e territorialmente situadas.

No meio físico, os impactos mais recorrentes concentram-se em alterações do uso e cobertura da terra, supressão da vegetação, compactação do solo, aumento do escoamento superficial, intensificação de processos erosivos, emissão de poeira durante a implantação, interferências na drenagem local e modificações paisagísticas. Tais efeitos decorrem, em grande medida, da preparação do terreno, da movimentação de máquinas, da instalação das estruturas de suporte e da reorganização espacial da superfície ocupada. Estudos como os de Tawalbeh et al. (2021) e Rabaia et al. (2021) indicam que essas transformações podem ocorrer antes mesmo do início da operação energética, o que reforça a necessidade de que a avaliação ambiental atribua centralidade às fases iniciais do empreendimento.

Entre os impactos físicos, merece destaque a recorrência crescente de discussões sobre alterações microclimáticas, sobretudo aumento da temperatura local e formação de ilhas de calor em áreas ocupadas por grandes plantas solares. Embora esse tema ainda não seja tratado com a mesma frequência que impactos mais tradicionais, sua presença na literatura internacional sugere a incorporação de uma agenda mais recente de preocupações ambientais associadas às UFV. Nesse ponto, a revisão indica que a literatura vem ampliando o repertório de impactos considerados relevantes, o que desafia a AIA a atualizar seus conteúdos analíticos e a incorporar temas emergentes, conforme discutem Morgan (2012) e Jiricka-Pürrer et al. (2018).

No meio biótico, a literatura revisada destacou, com elevada frequência, impactos relacionados à supressão de cobertura vegetal, perda e simplificação de habitats, perturbação da fauna pela movimentação de máquinas e pelo ruído, deslocamento de espécies, fragmentação ecológica e alterações na dinâmica funcional dos ecossistemas. Chen (2024), demonstram que as respostas da biodiversidade à implantação de UFV variam conforme o tipo de ecossistema, o histórico de uso da terra e o manejo adotado após a instalação. Isso indica que não se trata de impactos padronizados, mas de efeitos cuja magnitude e significância dependem da sensibilidade ambiental da área e da forma como o empreendimento se insere na paisagem.

Além dos efeitos mais diretamente associados à remoção da vegetação e à ocupação do solo, a literatura também aponta repercussões indiretas sobre polinizadores, aves, pequenos vertebrados e conectividade ecológica. Armstrong et al. (2021) mostram que determinadas estratégias de manejo podem reduzir perdas e favorecer serviços ecossistêmicos, mas tais resultados dependem de planejamento prévio, definição adequada de medidas e monitoramento contínuo. Sob essa ótica, a AIA não deve limitar-se à identificação taxonômica da biota afetada, devendo incorporar leitura funcional da paisagem, fluxos ecológicos e efeitos indiretos e cumulativos, em consonância com os princípios mais amplos de efetividade discutidos por Sadler (1996) e Bond, Morrison-Saunders e Howitt (2013).

No meio antrópico, os estudos revisados apontam um quadro mais ambivalente. De um lado, a implantação de usinas fotovoltaicas pode gerar empregos temporários, dinamizar economias locais, ampliar arrecadação e reforçar estratégias de diversificação da matriz energética, como observam Wang e Fan (2021) e Wassie e Adaramola (2021). De outro, a ocupação de extensas áreas pode produzir transformações no uso do território, afetar atividades agropecuárias, alterar a paisagem, tensionar relações fundiárias e desencadear conflitos em torno do acesso à terra e da distribuição dos benefícios decorrentes dos empreendimentos. Esses resultados reforçam que a dimensão social não constitui apêndice do diagnóstico ambiental, mas componente estruturante da avaliação.

A articulação entre os três meios analisados constitui um dos resultados mais relevantes da revisão. Alterações na cobertura da terra, no solo e na drenagem repercutem sobre habitats, biodiversidade e dinâmica ecossistêmica, ao mesmo tempo em que influenciam usos sociais do espaço, percepção paisagística e conflitos territoriais. Essa constatação reforça que a qualidade analítica da AIA depende de sua capacidade de reconhecer cadeias de impacto e interdependências entre componentes biofísicos e sociais. Nesse sentido, a literatura da área tem reiterado que estudos ambientais excessivamente compartimentalizados tendem a empobrecer a interpretação territorial e a limitar a utilidade da AIA para a tomada de decisão, conforme apontam Montaño e Souza (2008), Sánchez (2023).

É precisamente nesse ponto que os achados da revisão adquirem maior relevância para a discussão sobre a efetividade da AIA. O levantamento de um repertório amplo de impactos mencionados na literatura sugere que o sistema avaliativo precisa ser capaz de incorporar não apenas efeitos já tradicionalmente reconhecidos nos estudos ambientais, mas também impactos menos usuais, indiretos, cumulativos, sinérgicos e emergentes. Quando determinados temas permanecem subexplorados, abordados de forma superficial ou ausentes dos diagnósticos ambientais, cria-se uma dissociação entre o conhecimento científico disponível e os conteúdos efetivamente utilizados para subsidiar o licenciamento. Tal descompasso pode reduzir a capacidade do EIA/RIMA de oferecer base suficiente à decisão administrativa.

Dessa forma, a discussão não se restringe à identificação dos impactos em si, mas avança para a suficiência com que eles são considerados no âmbito do sistema de avaliação. A literatura sobre efetividade da AIA demonstra que a robustez do processo avaliativo está diretamente associada à qualidade dos estudos produzidos, à pertinência dos temas incorporados e à influência concreta dessas informações sobre a decisão pública. Sob essa perspectiva, a ausência ou a baixa incorporação de impactos já reconhecidos pela literatura tende a fragilizar a dimensão substantiva da AIA, na medida em que limita sua contribuição à proteção ambiental e à qualificação do processo decisório, conforme argumentam Sadler (1996), Cashmore et al. (2004) e Bond, Morrison-Saunders e Howitt (2013).

No caso das UFV, essa discussão assume relevância adicional em razão da rápida expansão dessa tipologia e da emergência de novos temas associados ao seu ciclo de vida. Além dos impactos diretamente observados nas fases de planejamento, implantação e operação, a literatura recente tem enfatizado a necessidade de considerar desativação, reaproveitamento de materiais, logística reversa, resíduos de módulos fotovoltaicos e potenciais passivos associados ao descarte inadequado. Cellura et al. (2023) e Sousa, Oliveira e Cunha (2023) destacam que a sustentabilidade do setor não pode ser examinada apenas sob o prisma da geração elétrica, devendo incluir também o ciclo ampliado de vida da tecnologia. Esse argumento converge com a noção de que a AIA precisa permanecer responsiva à incorporação de temas emergentes e à atualização contínua de seus referenciais analíticos.

Nessa direção, o LA, apoiado nos estudos ambientais, deve operar não como mera etapa procedimental, mas como instância de mediação qualificada entre expansão energética e proteção ambiental. Sua contribuição depende da capacidade de reconhecer áreas sensíveis, identificar populações e atividades potencialmente afetadas, avaliar alternativas locacionais e dimensionar medidas preventivas, mitigadoras, compensatórias e de monitoramento. Quanto mais abrangente e tecnicamente consistente for o diagnóstico, maior tende a ser a capacidade do sistema de AIA de orientar decisões prudentes, transparentes e aderentes às especificidades territoriais do empreendimento.

Assim, os resultados desta revisão indicam que o levantamento sistemático dos impactos mais citados na literatura científica pode constituir referência útil para refletir sobre a suficiência analítica dos estudos ambientais exigidos no licenciamento de UFV. Ainda que a presente pesquisa não tenha se dedicado à análise documental de EIAs específicos, o contraste entre a amplitude dos impactos reportados pela literatura e a recorrente discussão acadêmica sobre limitações dos estudos ambientais sugere a necessidade de aprofundar investigações sobre a incorporação efetiva desses conteúdos na prática avaliativa. Trata-se, portanto, de um campo promissor para o aprimoramento da AIA, tanto no plano metodológico quanto no plano institucional.

Considerações finais

A revisão bibliográfica realizada permitiu identificar um conjunto expressivo de impactos ambientais associados às UFV, distribuídos entre o meio físico, o meio biótico e o meio antrópico. Os resultados confirmam que, embora a geração solar fotovoltaica desempenhe papel relevante na transição energética, sua implantação não é isenta de efeitos territoriais, ecológicos e sociais. Ao contrário, trata-se de uma tipologia de empreendimento cuja análise ambiental requer abordagem técnica abrangente, integrada e sensível às especificidades do contexto de inserção.

O levantamento dos impactos mais recorrentes evidenciou que os efeitos associados às UFV extrapolam os aspectos tradicionalmente enfatizados nos diagnósticos ambientais mais convencionais. Além de alterações no uso da terra, supressão vegetal, compactação do solo e perturbações sobre a fauna e a flora, a literatura também aponta impactos indiretos, cumulativos, sinérgicos e emergentes, como mudanças microclimáticas, repercussões sobre conectividade ecológica, fragmentação de habitat transformações no uso do território, conflitos fundiários e desafios vinculados ao descomissionamento e à gestão de resíduos. Esse quadro reforça que a avaliação ambiental dessa atividade não pode restringir-se a abordagens parciais ou excessivamente setorizadas.

À luz da literatura sobre efetividade da AIA, os achados do estudo indicam que a capacidade do sistema avaliativo de qualificar a tomada de decisão depende, em larga medida, da abrangência e da consistência com que tais impactos são incorporados aos estudos que subsidiam o licenciamento. Quando o repertório de efeitos reconhecido pela produção científica não se converte, de forma satisfatória, em conteúdo analítico nos estudos ambientais, abre-se uma lacuna que pode comprometer a robustez do EIA, a utilidade do RIMA e a própria contribuição substantiva da AIA para a proteção ambiental. Essa discussão dialoga diretamente com o que propõem Sadler (1996), Sánchez (2023) e Ribeiro et al. (2021) acerca da centralidade da qualidade da identificação e análise dos impactos para a efetividade do sistema.

Desse modo, o estudo sustenta que o aprimoramento da AIA aplicada às UFV passa pela ampliação da qualidade das linhas de base, pelo fortalecimento da análise integrada entre os meios, pela incorporação de temas emergentes e pela atenção às diferentes fases do ciclo de vida dos empreendimentos. Mais do que atender a exigências procedimentais, trata-se de assegurar que o LA disponha de base técnica compatível com a complexidade dos efeitos potencialmente envolvidos. Sob essa perspectiva, a AIA não deve ser compreendida como obstáculo à expansão das fontes renováveis, mas como condição para que essa expansão ocorra sob critérios ambientalmente consistentes e territorialmente responsáveis.

Por fim, cabe destacar que a presente investigação oferece subsídios para o debate teórico e metodológico sobre a suficiência analítica da avaliação ambiental aplicada ao setor fotovoltaico. Ao sistematizar os principais impactos reportados na

literatura, o artigo contribui para a construção de parâmetros que podem orientar análises futuras sobre a correspondência, ou eventual distanciamento, entre o conhecimento científico disponível e os conteúdos efetivamente contemplados nos estudos ambientais. Nesse sentido, pesquisas posteriores baseadas na análise empírica de EIA/RIMA poderão aprofundar essa agenda e verificar, de modo mais direto, em que medida os impactos amplamente discutidos pela literatura vêm sendo incorporados aos processos concretos de licenciamento.

Referências Bibliográficas

ARMSTRONG, A.; BROWN, L.; DAVIES, G.; WHYATT, J. D.; POTTS, S. G. Honeybee pollination benefits could inform solar park business cases, planning decisions and environmental sustainability targets. Biological Conservation, v. 263, p. 109332, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109332. Acesso em: 22 mar. 2026.

AVERSA, I. D. C.; MONTANO, M. A defasagem de conhecimento na prática na Avaliação de Impacto Ambiental em projetos de energia eólica. Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 52, p. 114-141, 2019.

BOND, A.; MORRISON-SAUNDERS, A.; HOWITT, R. Sustainability assessment: pluralism, practice and progress. 1.ed. Londres: Routledge, 2012.

BOŠNJAKOVIĆ, M.; SANTA, R.; CRNAC, Z.; BOŠNJAKOVIĆ, T. Environmental Impact of PV Power Systems. Sustainability, v. 15, n. 15, p. 11888, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su151511888. Acesso em: 22 mar. 2026.

CELLURA, M.; LUU, L. Q.; GUARINO, F.; LONGO, S. A review on life cycle environmental impacts of emerging solar cells. Science of the Total Environment, v. 902, p. 166185, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166185. Acesso em: 22 mar. 2026.

CHEN, H.; WU, W.; LI, C.; LU, G.; YE, D.; MA, C.; REN, L.; LI, G. Ecological and environmental effects of global photovoltaic power plants: A meta-analysis. Journal of Environmental Management, v. 373, p. 123785, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123785. Acesso em: 22 mar. 2026.

DAVID, T. M.; SOUZA, T. M.; RIZOL, P. M. S. R. Photovoltaic systems: a review with analysis of the energy transition in Brazilian culture, 2018-2023. Energy Informatics, v. 7, n. 1, p. 14, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s42162-024-00316-4. Acesso em: 22 mar. 2026.

FISCHER, T. B. Impact assessment: there can be strength in diversity! Impact Assessment and Project Appraisal, v. 32, n. 1, p. 9–10, 2 Jan. 2014.

FISCHER, T.; NOBLE, B. Impact assessment research – achievements, gaps and future directions. Journal of Environmental Assessment Policy and Management, v. 17, n. 1, p. 1501001-1-1501001-12, 2015.

GLASSON, J.; THERIVEL, R. Introduction to environmental impact assessment. 5. ed. Londres: Routledge, 2019.
HULST, V. D. M. K.; HUIJBREGTS, M. A.; VAN LOON, N.; THEELEN, M., KOOTSTRA, L., BERGESEN, J. D.; HAUCK, M. A systematic approach to assess the environmental impact of emerging technologies: A case study for the GHG footprint of CIGS solar photovoltaic laminate. Journal of Industrial Ecology, v. 24, n. 6, p. 1234-1249, 2020.

JIRICKA-PÜRRER, A., CZACHS, C., FORMAYER, H., WACHTER, T. F., MARGELIK, E., LEITNER, M., & FISCHER, T. B. Climate change adaptation and EIA in Austria and Germany–Current consideration and potential future entry points. Environmental Impact Assessment Review, v. 71, p. 26-40, 2018.

LAKHOUIT, A.; ALHATHLAUL, N.; EL MOKHI, C.; HACHIMI, H. Assessing the Environmental Impact of PV Emissions and Sustainability Challenges. Sustainability, v. 17, n. 7, p. 2842, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su17072842. Acesso em: 22 mar. 2026.

LIMA, P. T. D.; MARIANO NETO, M.; ABRAHÃO, R. Análise dos processos de avaliação de impacto ambiental em usinas fotovoltaicas no Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 15, n. 3, p. 1260-1273, 2022. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/252652. Acesso em: 22 mar. 2026.

MONTAÑO, M.; SOUZA, M. P. D. A viabilidade ambiental no licenciamento de empreendimentos perigosos no Estado de São Paulo. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 13, p. 435-442, 2008.

MOON, B. Environmental impact assessment in Queensland, Australia: a governmental massacre! Impact Assessment and Project Appraisal, v.16, p.33–47, 1998.

MORGAN, R. K. Environmental impact assessment: the state of the art. Impact assessment and project appraisal, v. 30, n. 1, p. 5-14, 2012.

MORGAN, R. K. Environmental impact assessment: the state of the art. Impact assessment and project appraisal, v. 30, n. 1, p. 5-14, 2012.

MORRISON-SAUNDERS, A.; RETIEF, F. Reflections on impact assessment research scholarship from editor and academic perspectives. Journal of Environmental Assessment Policy and Management, v. 17, n. 1, p. 1550002-1- 1550002-8, 2015.

OLIVEIRA, E. A. F.; ARAÚJO FILHO, J. G. Perspectivas da geração e aplicação da energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão da literatura (2015-2019). Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n. 5, p. 435-450, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.005.0034. Acesso em: 22 mar. 2026.

PEÑA-GUZMÁN, C.; ULLOA-SÁNCHEZ, S.; MORA, K.; HELENA-BUSTOS, R.; LOPEZ-BARRERA, E.; ALVAREZ, J.; RODRIGUEZ-PINZÓN, M. Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: A review of the current literature. Journal of environmental management, v. 237, p. 408-423, 2019.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; DE LIMA, F. J. L.; RUTHER, R.; DE ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; DE SOUZA, J. G. Atlas brasileiro de Energia Solar. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

RABAIA, M. K. H.; ABDELKAREEM, M. A.; SAYED, E. T.; ELSAID, K.; CHAE, K. J.; WILBERFORCE, T.; OLABI, A. G. Environmental impacts of solar energy systems: A review. Science of the Total Environment, v. 754, p. 141989, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141989. Acesso em: 22 mar. 2026.

RIBEIRO, J. C. J. et al. Licenciamento e avaliação de impacto ambiental. 1. ed. São Paulo: Lumen Juris, 2021.

SADLER, B. International studyof the effectiveness of environmental assessment. Final report: environmental assessment in a changing world: evaluating practice to improve performance. Canadá: Canadian Environmental Assessment Agency, 1996.

SÁNCHEZ, L. E. Avaliação de impacto cumulativo. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2023.

SOUSA, N. M.; OLIVEIRA, C. B. M.; CUNHA, D. R. Photovoltaic electronic waste in Brazil: Circular economy challenges, potential and obstacles. Social Sciences & Humanities Open, v. 7, p. 100456, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2023.100456. Acesso em: 22 mar. 2026.

TABARELLI, M.; LEAL, I. R.; SCARANO, F. R.; SILVA, J. (2018). Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade. Ciência e cultura, v. 70, n. 4, p. 25-29, 2018.

TAWALBEH, M.; AL-OTHMAN, A.; KAFIAH, F.; ABDELSALAM, E.; ALMOMANI, F.; ALKASRAWI, M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. Science of the Total Environment, v. 759, p. 143528, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528. Acesso em: 22 mar. 2026.

VERONEZ, F. A. Efetividade da avaliação de impacto ambiental de projetos no estado do Espírito Santo. Tese (Curso de Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2018.

WANG, Z.; FAN, W. Economic and environmental impacts of photovoltaic power with the declining subsidy rate in China. Environmental Impact Assessment Review, v. 87, p. 106535, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106535. Acesso em: 22 mar. 2026.

WASSIE, Y. T.; ADARAMOLA, M. S. Socio-economic and environmental impacts of rural electrification with Solar Photovoltaic systems: Evidence from southern Ethiopia. Energy for Sustainable Development, v. 60, p. 52-66, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.12.002. Acesso em: 22 mar. 2026.

ZARZAVILLA, M.; QUINTERO, A.; ABELLÁN, M. A.; SERRANO, F. L.; AUSTIN, M. C.; TEJEDOR-FLORES, N. Comparison of Environmental Impact Assessment Methods in the Assembly and Operation of Photovoltaic Power Plants: A Systematic Review in the Castilla-La Mancha Region. Energies, v. 15, n. 5, p. 1926, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en15051926. Acesso em: 22 mar. 2026.

A LEI GERAL DO LICENCIAMENTO AMBIENTAL E A TRANSIÇÃO DO CONTROLE AMBIENTAL: UMA ANÁLISE COMPARATIVA EM CINCO ESTADOS BRASILEIROS

1 Rafael Sales de Castro, 2 Caio César de Sousa Mello, 3 Camila Costa de Amorim Amaral
1 Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: rafaelsales.ufmg.ea@gmail.com; 2 Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: caiocsmello@gmail.com; 3 Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: camila@desaufmg.br

Palavras-chave: Licenciamento ambiental; Lei Federal nº 15.190/2025; *Process tracing* casual.

Resumo

Este artigo analisa a transição do licenciamento ambiental no Brasil após a Lei Federal nº 15.190/2025. O objetivo é comparar mecanismos de cinco estados (CE, GO, MG, SC e TO) com a nova norma geral, focando na Licença Ambiental por Adesão e Compromisso (LAC). Utilizou-se o método de *process tracing* casual para rastrear a evolução dos ritos estaduais frente à uniformização federal. Os resultados indicam que a Lei Geral nacionaliza práticas anteriormente judicializadas, como no Tocantins, e incorpora modelos de emissão automática e renovação eletrônica já adotados em Goiás e Santa Catarina. Observa-se a expansão do enquadramento da LAC para atividades de médio potencial poluidor, em comparação a estados como o Ceará. Conclui-se que a nova legislação altera a lógica do controle ambiental, substituindo a análise técnica prévia pela fiscalização posterior. Essa mudança prioriza a celeridade e a segurança jurídica, condicionando sua efetividade à ampliação da transparência por meio da integração de dados nacionais.

Introdução

O licenciamento ambiental constitui o principal instrumento da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), instituída pela Lei nº 6.938/1981 (Brasil, 1981), voltada à prevenção e à proteção do meio ambiente. Historicamente, o regramento do licenciamento no Brasil baseou-se em resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), notadamente as Resoluções Conama nº 01/1986 (Brasil, 1986) e nº 237/1997 (Brasil, 1997). Como pode ser observado na 2ª edição do livro "Procedimentos de Licenciamento Ambiental do Brasil" (Brasil, 2026), essa estrutura normativa resultou em um cenário de acentuada fragmentação e autonomia interpretativa por parte dos entes federados. Diante desse vácuo legislativo em nível de lei ordinária, foi sancionada a Lei Federal nº 15.190, de 8 de agosto de 2025, denominada Lei Geral do Licenciamento Ambiental, com o objetivo de conferir celeridade, previsibilidade, padronização e segurança jurídica aos procedimentos administrativos ambientais (Brasil, 2025a).

Contudo, a gênese e a aprovação desse novo marco legal foram acompanhadas por intensos debates e críticas provenientes de autoridades técnicas e da comunidade científica. O Conselho Federal de Biologia (CFBio) manifestou preocupação quanto à norma, argumentando que a Lei nº 15.190/2025 pode fragilizar os preceitos do Art. 225 da Constituição Federal ao alterar o sistema de controle e potencialmente comprometer a integridade dos ecossistemas e a segurança socioambiental do país (CFBio, 2025). No mesmo sentido, o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (Iphan) alertou para a fragilização da proteção ao patrimônio cultural brasileiro, destacando que a automação de processos e a redução da participação de órgãos intervenientes podem resultar em danos irreversíveis a bens arqueológicos e históricos (Iphan, 2025).

A crítica central sustenta que a nova legislação promove uma flexibilização excessiva ao priorizar a celeridade em detrimento da eficácia do controle ambiental, o que caracteriza um quadro de retrocesso nas políticas de proteção (Jorge; Caliman, 2026). Um dos pontos de maior controvérsia reside na oficialização de modalidades simplificadas, como a Licença Ambiental por Adesão e Compromisso (LAC) e a Licença Ambiental Única (LAU), já adotadas de forma heterogênea pelos estados, muitas vezes sob questionamento judicial por falta de amparo em lei federal (Milani *et al*., 2026). Além disso, a criação da Licença Ambiental Especial (LAE) é apontada como um mecanismo de exceção voltado a projetos considerados estratégicos, com potencial de reduzir o rigor técnico necessário à mitigação de impactos significativos (Sánchez; Fonseca, 2025).

Nesse contexto, coloca-se a necessidade de avaliar se a padronização trazida pela Lei Federal nº 15.190/2025 serve como um elemento de compatibilização técnica ou se estabelece um nivelamento deficitário dos critérios de proteção ambiental. O presente artigo tem como objetivo analisar comparativamente a transição dos mecanismos de licenciamento em cinco estados brasileiros, selecionados como recorte representativo do conjunto das unidades federativas, buscando identificar se a nova legislação legitima práticas anteriormente judicializadas ou se introduz novos parâmetros de rigor. Por meio do método de *process tracing* causal (Steiner, 2009), busca-se investigar o funcionamento desse mecanismo de transição legal e suas implicações para a governança ambiental subnacional, confrontando a ênfase da celeridade com a prática do controle técnico exercido pelos órgãos licenciadores.

Material e Métodos

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso múltiplo, de natureza qualitativa e descritiva, fundamentado na análise documental e comparativa de instrumentos de licenciamento ambiental. Para a execução da análise, adotaram-se como base os instrumentos normativos vigentes nas legislações estaduais até o ano de 2025, contrastando-os com os ritos previstos na Resolução Conama nº 237/1997 (Brasil, 1997) e o novo aparato legal trazido pela Lei Federal nº 15.190/2025 (Brasil, 2025a). A abordagem metodológica emprega o *process tracing* causal que, conforme proposto por Steiner (2009), constitui-se como uma

ferramenta adequada para o exame de políticas ambientais ao permitir o rastreamento do mecanismo causal (neste estudo, a transição legislativa) e as interações entre os elementos desse mecanismo, representados pelas normas estaduais preexistentes em face da nova diretriz federal. O método busca identificar evidências de continuidade ou ruptura nos critérios de controle ambiental, examinando como essas normas antecederam e influenciaram a configuração da diretriz federal. Assim, pretende-se explicar a consolidação da automação e da simplificação dos ritos em nível nacional.

O recorte espacial da amostra, originalmente composta pelas 27 unidades federativas e pelo órgão federal (Ibama), foi delimitado a cinco estados representativos de diferentes modelos de gestão e contextos regionais. A seleção incluiu os estados do Ceará, Goiás, Tocantins, Minas Gerais e Santa Catarina. A análise concentrou-se na Licença Ambiental por Adesão e Compromisso (LAC), por representar a maior ruptura procedimental frente ao modelo clássico. Realizou-se uma comparação sistemática entre as normativas estaduais e a norma geral federal quanto aos critérios de enquadramento, condições de aplicação, prazos de validade, possibilidade de renovação automática e natureza do acompanhamento técnico. Essa etapa avaliou se os parâmetros federais elevam ou reduzem o rigor preventivo anteriormente exigido pelos estados. Por fim, a análise investigou como a nova norma federal se posiciona frente aos procedimentos que foram alvo de contestação judicial até 2025 (como verificado no caso do Tocantins), discutindo se a unificação nacional promove a regularização de práticas controversas ou se estabelece novos patamares de controle e transparência ambiental.

Resultados e Discussão

A análise comparativa entre a Resolução Conama nº 237/1997 e a nova Lei Geral permite avaliar a origem da necessidade de se estabelecer tal marco legislativo. O **Quadro 01** apresenta uma comparação pontual entre as duas legislações. Cabe ressaltar que a referida Resolução permanece em vigor, porém hierarquicamente sobreposta pela nova lei, que passa a estabelecer o rito dos procedimentos a serem adotados pelas autoridades licenciadoras.

Quadro 01: Comparativo dos instrumentos e ritos processuais no âmbito federal.

Parâmetro de Comparação	Resolução Conama nº 237/1997	Lei Federal nº 15.190/2025
Tipos de Licença	Licença Prévia (LP), Licença de Instalação (LI) e Licença de Operação (LO)	LP, LI, LO, Licença Ambiental por Adesão e Compromisso (LAC), Licença Ambiental Única (LAU), Licença Ambiental Especial (LAE) e Licença de Operação Corretiva (LOC)
Não sujeição ao licenciamento	Baseada em listagem positiva (Art. 2º); isenções dependentes de normas estaduais	Art. 9º: Institui a não sujeição para atividades agropecuárias (cultivo, pecuária extensiva e intensiva de pequeno porte)
Escopo da Simplificação	Art. 12: Restrito a empreendimentos de pequeno impacto ambiental.	Arts. 20, 21 e 22: Define os ritos Bifásico, Fase Única (LAU) e Por Adesão e Compromisso (LAC); aplicável a atividades de pequeno ou médio porte e baixo ou médio potencial poluidor
Autoridades Envolvidas (Intervenientes)	Prevista em outras normativas	Arts. 42 e 44: Manifestação não vinculante e prosseguimento do rito na ausência de resposta da autoridade

Fonte: elaborado pelos autores.

Inicialmente observa-se o aumento no número de modalidades de licença: três em 1997 e sete em 2025. Apesar de a maioria dos estados já possuir mais de três tipos de licença, com modalidades adaptadas às especificidades regionais, conforme as atribuições da Lei Complementar Federal (LC) 140/2011 (Brasil, 2011), a Lei Geral inova ao "oficializar" a possibilidade de rito por adesão e compromisso e o licenciamento especial, este último não previsto, até 2025, em nenhum ente federativo (Brasil, 2026). Além disso, a Resolução Conama lista em seu Anexo I as atividades sujeitas ao licenciamento ambiental (Brasil, 1997), o que permitiu às legislações estaduais e federais definirem categorias de dispensa, isenção ou inexigibilidade com base na ausência de previsão na norma geral ou em listagens de risco irrelevante

Nesse sentido, é importante notar que o regime de inexigibilidade e dispensa já apresentava contornos específicos em normas infralegais federais. Conforme apontado em Brasil (2026), a Portaria Ibama nº 90/2025 (Brasil, 2025b) e normativas anteriores, como a Instrução Normativa Ibama nº 15/2018 (Brasil, 2018), já haviam consolidado hipóteses de dispensa por excepcionalidade normativa para atividades de potencial insignificante de degradação (Brasil, 2026). Tais isenções abrangiam desde empreendimentos em terras indígenas até atividades de caráter militar e determinadas instalações radiativas. Contudo, a Lei Geral institui, em seu Art. 9º, a não sujeição explícita de atividades agropecuárias ao licenciamento ambiental, diferindo do modelo anterior de dispensa técnica (Brasil, 2025a). Enquanto as isenções do Ibama eram pautadas em critérios de risco leve ou

utilidade pública específica, o novo marco federal estabelece um regime de inexigibilidade amplo para o setor agropecuário, condicionando-o primordialmente à regularidade do Cadastro Ambiental Rural (CAR), o que implica sobreposição de competências estaduais e a nacionalização de uma zona de exclusão de controle prévio para atividades produtivas de larga escala.

Ao contrastar essa nova sistemática com o procedimento anterior, observa-se que o Art. 12 da Resolução Conama nº 237/1997 delega ao órgão ambiental a competência para definir procedimentos simplificados, restringindo-os estritamente a empreendimentos de pequeno impacto ambiental (Brasil, 1997). Em contrapartida, os Arts. 20, 21 e 22 da Lei nº 15.190/2025 expandem significativamente esse escopo, permitindo que atividades qualificadas como de médio porte e médio potencial poluidor sejam licenciadas por ritos como a LAC (Brasil, 2025a). Essa alteração representa um mecanismo de redução da análise técnica prévia, uma vez que a LAC, conforme o Art. 22, fundamenta-se na autodeclaração por meio do Relatório de Caracterização do Empreendimento (RCE), transferindo a análise de conformidade para uma etapa posterior à emissão do título autorizativo (Brasil, 2025a).

Essa transição para modelos autodeclaratórios e automáticos em atividades de médio impacto é o que fundamenta as críticas de entidades como o CFBio (2025), que alertam para a fragilização do controle preventivo. Outro ponto de ruptura identificado no processo de harmonização normativa refere-se à participação das autoridades envolvidas, tratada nos Arts. 42 a 44 da Lei Geral: a nova Lei impõe prazos específicos e estabelece o prosseguimento do licenciamento mesmo diante da ausência de manifestação do interveniente (Art. 44, § 4º). Tal dispositivo é apontado pelo Iphan (2025) como um risco direto à integridade do patrimônio cultural e arqueológico, visto que o "silêncio positivo" pode inviabilizar a análise de impactos em territórios onde a presença de bens acautelados não é previamente conhecida pelo órgão licenciador.

Pontua-se ainda que a criação da LAE para projetos estratégicos introduz uma seletividade procedimental que não encontra precedentes na gestão estadual consolidada. Segundo Sánchez e Fonseca (2025), a LAE pode ser interpretada como mecanismo de priorização procedimental que, ao acelerar cronogramas de projetos estratégicos (Art. 10), pode reduzir o rigor das análises ambientais e limitar a participação pública. Portanto, a comparação inicial entre os marcos federais revela que a Lei nº 15.190/2025 não apenas organiza o sistema, mas altera a relação entre discricionariedade técnica e obrigatoriedade legal, estabelecendo ritos que priorizam a celeridade administrativa em detrimento da profundidade das análises de impacto ambiental em escala nacional.

O **Quadro 02** apresenta a síntese das licenças e normas vigentes até o ano de 2025 nos estados selecionados para a amostra. A análise desses dados revela diferenças na forma como os entes federativos estruturaram os procedimentos de licenciamento ambiental. Em Minas Gerais, conforme a Deliberação Normativa Copam nº 217/2017, o sistema organiza-se em três eixos: o Licenciamento Ambiental Simplificado (LAS), subdividido nas modalidades de "cadastro" ou com apresentação de Relatório Ambiental Simplificado (RAS); o Licenciamento Ambiental Concomitante (LAC), que permite a aglutinação de duas ou três fases processuais (LAC1 e LAC2); e o Licenciamento Ambiental Trifásico (LAT), mantendo o rito sequencial clássico de LP, LI e LO para projetos de maior impacto (Minas Gerais, 2017).

Quadro 02: Instrumentos legais dos estados selecionados para análise.

Estado	Legislação Principal	Licenças (L) Estaduais Preexistentes
Ceará	Resolução Coema nº 02/2019 (Ceará, 2019)	LP, LI, LO, LAC, LAU, LP de Instalação (LPI), LI e Ampliação (Liam), Liam para Readequação (Liar) e L. de Instalação e Operação (LIO)
Goiás	Lei Estadual nº 20.694/2019 (Goiás, 2019) e Decreto Estadual nº 9.710/2020 (Goiás, 2020)	LP, LI, LO, LAC, LAU, L. de Ampliação ou Alteração (LA) e L. Corretiva (LC)
Minas Gerais	Deliberação Normativa Copam nº 217/2017 (Minas Gerais, 2017)	LP, LI, LO e L. Ambiental Simplificada (LAS)
Santa Catarina	Lei Estadual nº 14.675/2009 (Santa Catarina, 2009) e Resolução Consema nº 250/2024 (Santa Catarina, 2024)	Autorização Ambiental (AuA - Licenciamento Simplificado), L. Ambiental Prévia (LAP), LAP com dispensa de L. Ambiental de Instalação (LAI), LAI, L. Ambiental de Operação (LAO) e L. Ambiental por Compromisso (LAC)
Tocantins	Resolução Coema/TO n° 07/2005 (Tocantins, 2005) e Lei Estadual nº 3.804/2021 (Tocantins, 2021)	LP, LI e LO

Fonte: elaborado pelos autores.

Como é possível observar, há uma disparidade na quantidade e na tipologia de licenças adotadas, o que gerava um cenário de insegurança jurídica, especialmente em estados nos quais a inovação procedimental entrou em conflito com a interpretação do Poder Judiciário. O estado do Tocantins exemplifica esse cenário, no qual licenças instituídas pela Lei Estadual nº 3.804/2021 (Tocantins, 2021), como a Licença Ambiental Autodeclaratória (LAD) e a LAC, foram declaradas

inconstitucionais pelo Supremo Tribunal Federal na Ação Direta de Inconstitucionalidade (ADI) nº 0002692-27.2022.8.27.2700 (Brasil, 2024). O entendimento foi de que o estado não poderia criar modalidades de licenciamento sem o respaldo de uma lei federal que estabelecesse normas gerais. Esse vácuo legislativo forçou a retomada do rito trifásico clássico em Tocantins, situação que a Lei nº 15.190/2025 pacifica ao nacionalizar instrumentos que antes eram exclusivos da esfera estadual (Brasil, 2025a).

Essa unificação nacional, todavia, promove uma mudança estrutural na lógica do controle ambiental. O *process tracing* indica que a Lei Geral adota como padrão nacional ritos de "emissão automática", que apresentam paridade funcional com a LAC adotada em estados como Ceará, Goiás e Santa Catarina, bem como com o Licenciamento Ambiental Simplificado na modalidade Cadastro (LAS-Cadastro) de Minas Gerais. Conforme o Art. 12 da DN Copam nº 217/2017, a LAS-Cadastro é realizada eletronicamente com emissão imediata da licença, mecanismo que foi replicado na LAC federal (Art. 22) (Minas Gerais, 2017; Brasil, 2025a). Contudo, observa-se a ampliação do alcance desse modelo: enquanto em Minas Gerais ritos autodeclaratórios são restritos a atividades de impacto não significativo (Classes 1 e 2), a Lei nº 15.190/2025 estende essa possibilidade para empreendimentos qualificados como de médio porte e médio potencial poluidor.

Assim, a transição para procedimentos automáticos em atividades de maior complexidade altera a distribuição de responsabilidades do órgão ambiental, substituindo a conferência técnica prévia pela fiscalização posterior por amostragem. Se anteriormente sistemas como o de Santa Catarina ou a modalidade LAS com relatório (RAS) de Minas Gerais exigiam a conferência técnica de documentos antes da emissão do título para médio potencial, a nova diretriz federal prioriza a celeridade administrativa. Para avaliar se essa uniformização resulta em uma efetiva harmonização técnica ou em uma redução do rigor preventivo, o **Quadro 03** apresenta a comparação entre os limites de enquadramento estaduais e as modalidades equivalentes ao rito de adesão e compromisso.

Quadro 03: Comparação das licenças equivalentes a LAC nos estados analisados.

Ente	Enquadramento	Condições	Validade	Renovação Automática?	Principal estudo ou forma de acompanhamento
Ceará	Porte (Po) menor que micro (Ceará, 2019)	Conhecimento prévio dos impactos e da área de implantação (Ceará, 2019)	03 anos (Ceará, 2019)	Não (Ceará, 2019)	Rel. de Acompanhamento e Monitoramento Ambiental (Ceará, 2019)
Goiás	Exceto para Classe 6 (Po grande e PP alto) (Goiás, 2019)	Efeitos no ambiente meio determinados previamente pela tipologia e Po (Goiás, 2019)	05 a 10 anos (Goiás, 2020)	Sim (Goiás, 2019)	Controles eletrônicos prévios para atestar veracidade de declarações(Goiás, 2019)
Minas Gerais	Todos os Po com PP pequeno (Classe 1) ou Po pequeno com PP médio (Classe 2) (Minas Gerais, 2017)	Classe 1: não localizado em Unidade de Conservação (UC) ou Sítios Ramsar (RS), sem supressão de vegetação nativa; Classe 2: área sem critérios locacionais específicos (Minas Gerais, 2017)	10 anos (Minas Gerais, 2017)	Não expressa na norma	Cadastro de informações pelo empreendedor em sistema eletrônico (Minas Gerais, 2017)
Santa Catarina	Pequeno ou médio Po e de pequeno ou médio PP (Santa Catarina, 2009)	Quando envolver supressão de vegetação nativa (Santa Catarina, 2009)	03 a 05 anos (Santa Catarina, 2024)	Sim (Santa Catarina, 2024)	Aceite de condicionantes estabelecidas previamente (Santa Catarina, 2009)
Tocantins (LAD)	Impacto ambiental mínimo (Tocantins, 2021)	Definição a ser feita pelo Coema (Tocantins, 2021)	Mínimo de 05 anos (Tocantins, 2021)	Não expressa na norma	Monitoramento e fiscalização com base nas informações da autodeclaração (Tocantins, 2021)
Tocantins (LAC)	Definido pelo Coema (Tocantins, 2021)	Atos administrativos dependentes de análise técnica sejam emitidos anteriormente à licença (Tocantins, 2021)		Não expressa na norma	Medidas preventivas, mitigadoras, compensatórias e de monitoramento disciplinadas em manual técnico (Tocantins, 2021)

Fonte: elaborado pelos autores.

A inclusão dos dados referentes ao estado do Tocantins no **Quadro 03** tem como finalidade a comparação técnica e histórica, já que ambas as licenças foram declaradas inconstitucionais (Brasil, 2024). Ao confrontar as práticas estaduais com o regramento da Lei Federal nº 15.190/2025, percebe-se que a nova LAC federal (Art. 22) apresenta um enquadramento mais abrangente que os modelos do Ceará e de Minas Gerais (Brasil, 2025a). Enquanto o Ceará restringe o rito ao porte menor que micro (Ceará, 2019) e Minas Gerais às classes de impacto 1 e 2 (Minas Gerais, 2017), a norma federal permite sua aplicação a atividades de médio porte e médio potencial poluidor (Art. 22, inciso I). Essa expansão é condicionada ao conhecimento prévio

dos impactos e da área (Art. 22, inciso II), vedando expressamente a modalidade em situações de supressão de vegetação nativa, remoção de populações ou intervenções em áreas sensíveis (Art. 22, incisos III e IV) (Brasil, 2025a).

Aprofundando a análise sobre a validade e renovação, observa-se que a Lei Federal adota o prazo máximo de dez anos (Art. 6º, inciso IV), aproximando-se do padrão observado em Goiás e Minas Gerais (Goiás, 2020; Minas Gerais, 2017), o que contrasta com a periodicidade trienal ainda praticada no Ceará (Ceará, 2019). A principal inovação federal reside na institucionalização da renovação automática (Art. 7º, § 4º) para atividades de baixo ou médio potencial poluidor e pequeno ou médio porte (Brasil, 2025a). Esse mecanismo, já operado por Goiás e Santa Catarina (Goiás, 2020; Santa Catarina, 2009), exige declaração eletrônica do empreendedor e relatório assinado por profissional habilitado (Art. 7º, § 6º), consolidando a tendência de substituição da análise técnica prévia pela fiscalização posterior por amostragem (Art. 22, §§ 3º e 4º). Tal mudança desloca o ônus da prova para o empreendedor e seu responsável técnico, reduzindo a atuação direta do Estado na prorrogação da validade dos títulos.

Finalmente, as demais modalidades simplificadas federais apresentam similaridade com os instrumentos estaduais analisados, mas introduzem mecanismos específicos de eficiência. A Licença Ambiental Única (LAU) permite a emissão em etapa única para atividades compatíveis (Art. 21), sendo subsidiada por Relatório de Controle Ambiental (RCA) e Plano de Controle Ambiental (PCA) (Art. 5º, inciso IV) com validade de até dez anos (Brasil, 2025a). Já a Licença Ambiental Especial (LAE) institui regime prioritário para projetos estratégicos definidos pelo Conselho de Governo, como usinas hidrelétricas e seus reservatórios (Art. 24, § 2º) (Brasil, 2025a). Esta modalidade exige o Estudo Prévio de Impacto Ambiental (EIA), mantendo o rigor técnico (Art. 5º, § 1º, inciso I), mas estabelece prioridade na tramitação e emissão de anuências por parte de todas as entidades públicas envolvidas (Art. 25, parágrafo único) (Brasil, 2025a). Tais dispositivos reforçam a mudança na lógica do licenciamento nacional: combinando celeridade administrativa em projetos estratégicos e automação em atividades de médio impacto, compensadas pela exigência de transparência via integração de dados ao Sinima (Brasil, 2025a).

Considerações Finais

A análise comparativa entre as normas estaduais e a Lei Federal nº 15.190/2025 revela que a nova Lei Geral cumpre seu papel de uniformização ao padronizar, em nível nacional, ritos simplificados e autodeclaratórios que, até então, operavam em um cenário de insegurança jurídica. O *process tracing* permitiu identificar que a transição legislativa não apenas conferiu lastro legal a práticas anteriormente contestadas (como evidenciado no histórico de suspensões judiciais no Tocantins), mas também promoveu um deslocamento de paradigma no controle ambiental brasileiro. Conclui-se que a nova norma federal tendeu a reproduzir modelos de gestão mais flexíveis, observados em estados como Goiás e Santa Catarina, em detrimento de estruturas mais conservadoras baseadas no modelo anterior da Resolução Conama nº 237/1997. A expansão da LAC para atividades de médio porte e médio potencial poluidor representa o ponto de maior ruptura técnica, uma vez que retira do Estado a responsabilidade pela análise técnica prévia de parcela significativa dos empreendimentos, transferindo a responsabilidade da conformidade ambiental para a esfera do empreendedor e do profissional habilitado. Nesse contexto, a celeridade e a previsibilidade prometidas pelo novo marco legal estabelecem um "nivelamento" procedimental que, embora reduza o tempo de resposta administrativa, introduz riscos associados à automação em atividades de impacto relevante. A eficácia desse modelo dependerá, portanto, da robustez dos sistemas de monitoramento e da capacidade de fiscalização posterior por amostragem, conforme previsto no novo regramento. A integração obrigatória de dados ao Sinima configura-se como mecanismo de transparência necessário ao controle social diante da redução da análise técnica prévia estatal. Em suma, a Lei Federal nº 15.190/2025 consolida a transição para um modelo de licenciamento digital em escala nacional. Para a engenharia e a gestão ambiental, o desafio futuro reside na garantia de que a simplificação do rito não resulte em fragilização da proteção ecossistêmica, exigindo que a simplificação do rito seja acompanhada por maior rigor na responsabilidade técnica e por instrumentos de controle digital capazes de assegurar a integridade do patrimônio ambiental brasileiro.

Referências Bibliográficas

BRASIL. **Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Publicada no Diário Oficial da União em 02 de setembro de 1981. Alterada pelas Leis nº 7.804, de 18 de julho de 1989; nº 8.028, de 12 de abril de 1990; nº 9.960, de 28 de janeiro de 2000; nº 9.966, de 28 de abril de 2000; nº 9.985, de 18 de julho de 2000; nº 10.165, de 27 de dezembro de 2000; nº 11.105, de 24 de março de 2005; nº 11.284, de 02 de março de 2006; nº 11.941, de 27 de maio de 2009; nº 12.651, de 25 de maio de 2012; nº 12.856, de 02 de setembro de 2013; nº 14.876, de 31 de maio de 2024; e nº 14.932, de 23 de julho de 2024; e pela Lei Complementar nº 140, de 08 de dezembro de 2011. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 2 abr. 2026.

BRASIL. **Resolução Conama nº 01, de 23 de janeiro de 1986**. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Publicada no Diário Oficial da União em 17 de fevereiro de 1986. Alterada pelas Resoluções Conama nº 11, de 18 de março de 1986; nº 05, de 06 de agosto de 1987; e nº 237, de 19 de dezembro de 1997. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=745. Acesso em: 2 abr. 2026.

BRASIL. **Resolução Conama nº 237, de 19 de dezembro de 1997**. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o Licenciamento Ambiental. Publicada no Diário Oficial da União em 22 de dezembro de 1997. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=237. Acesso em: 2 abr. 2026.

BRASIL. **Lei Complementar Federal nº 140, de 08 de dezembro de 2011**. Fixa normas, nos termos dos incisos III, VI e VII do caput e do parágrafo único do art. 23 da Constituição Federal, para a cooperação entre a União, os estados, o Distrito Federal e os municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum relativas à proteção das paisagens naturais notáveis, à proteção do meio ambiente, ao combate à poluição em qualquer de suas formas e à preservação das florestas, da fauna e da flora; e altera a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Publicada no Diário Oficial da União em 09 de dezembro de 2011 e retificada em 12 de dezembro de 2011. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp140.htm. Acesso em: 2 abr. 2026.

BRASIL. **Instrução Normativa Ibama nº 15, de 18 de maio de 2018**. Dispõe sobre as atividades ou empreendimentos de iniciativa dos povos indígenas em suas próprias terras, ou de iniciativa do Poder Público em terras indígenas cujos beneficiários são as comunidades indígenas, não sujeitos ao licenciamento ambiental. Publicada no Diário Oficial da União em 21 de maio de 2018 e republicado em 23 de maio de 2018; e 24 de maio de 2018. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=138228. Acesso em: 2 abr. 2026.

BRASIL. **Supremo Tribunal Federal.** Ação Direta de Inconstitucionalidade nº 0002692-27.2022.8.27.2700. Relator: Min. Dias Toffoli. Requerente: Procurador-Geral de Justiça do Estado do Tocantins. Intimado: Governador do Estado do Tocantins. Disponível em: https://portal.stf.jus.br/processos/detalhe.asp?incidente=6762826. Acesso em: 12 abr. 2026.

BRASIL. **Lei Federal nº 15.190, de 08 de agosto de 2025**. Dispõe sobre o licenciamento ambiental; regulamenta o inciso IV do § 1º do art. 225 da Constituição Federal; altera as Leis nºs 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 (Lei dos Crimes Ambientais), 9.985, de 18 de julho de 2000, e 6.938, de 31 de agosto de 1981; revoga dispositivos das Leis nºs 7.661, de 16 de maio de 1988, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e dá outras providências. Publicada no Diário Oficial da União, edição extra, em 08 de agosto de 2025 e retificada em 11 de agosto de 2025. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/lei/L15190.htm. Acessado em: 2 abr. 2026. (2025a).

BRASIL. **Portaria Ibama nº 90, de 24 de junho de 2025**. Torna sem efeito a Portaria nº 88, de 18 de junho de 2025, publicada no Diário Oficial da União, Seção 1, em 24 de junho de 2025. Publicada no Diário Oficial da União em 25 de junho de 2025. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=139504. Acesso em: 2 abr. 2026. (2025b).

BRASIL. **Procedimentos de Licenciamento Ambiental do Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2ª edição, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/governanca/procedimentos-licenciamento-ambiental-brasil.pdf. Acesso em: 2 abr. 2026.

CEARÁ. **Resolução Coema nº 02, de 11 de abril de 2019**. Dispõe sobre os procedimentos, critérios, parâmetros e custos aplicados aos processos de licenciamento e autorização ambiental no âmbito da Superintendência Estadual do Meio Ambiente – SEMACE. Publicada no Diário Oficial do Estado do Ceará em 17 de maio de 2019. Alterada pelas Resoluções Coema nº 05, de 1º de agosto de 2019; nº 10, de 10 de dezembro de 2020; nº 01, de 10 de fevereiro de 2022; nº 13 de 6 de outubro de 2022; nº 01, de 1º agosto de 2024; e nº 03, de 12 de junho de 2025. Disponível em: http://imagens.seplag.ce.gov.br/PDF/20190517/do20190517p03.pdf#page=7. Acesso em: 2 abr. 2026.

CFBio. **Nota de Repúdio à Lei Federal nº 15.190/2025 e à fragilização do Licenciamento Ambiental no Brasil**. Conselho Federal de Biologia, dez. 2025. Disponível em: https://cfbio.gov.br/2025/12/26/nota-de-repudio-a-lei-federal-no-15-190-2025-e-a-fragilizacao-do-licenciamento-ambiental-no-brasil/. Acesso em: 2 abr. 2026.

GOIÁS. **Lei Estadual nº 20.694, de 26 de dezembro de 2019**. Dispõe sobre normas gerais para o Licenciamento Ambiental do Estado de Goiás e dá outras providências. Publicada no Diário Oficial do Estado de Goiás em 27 de dezembro de 2019, suplemento. Alterada pelas Leis nº 20.773, de 08 de maio de 2020; nº 20.918, de 21 de dezembro de 2020; nº 20.958, de 12 de janeiro de 2021; nº 20.691, de 13 de janeiro de 2021; nº 21.062, de 20 de julho de 2021; nº 21.627, de 16 de novembro de 2022; nº 22.017, de 14 de junho de 2023; nº 22.368, de 31 de outubro de 2023; e nº 22.567, de 15 de março de 2024. Disponível em: https://legisla.casacivil.go.gov.br/api/v2/pesquisa/legislacoes/100893/pdf. Acesso em: 2 abr. 2026.

GOIÁS. **Decreto Estadual nº 9.710, de 03 de setembro de 2020**. Regulamenta, no âmbito do Poder Executivo Estadual, a Lei Estadual nº 20.694 , de 26 de dezembro de 2019 , que dispõe sobre as normas gerais para o Licenciamento Ambiental no Estado de Goiás e dá outras providências. Publicada no Diário Oficial do Estado de Goiás em 03 de setembro de 2020. Alterada pelos Decretos nº 10.054, de 25 de fevereiro de 2022; e nº 10.371, de 20 de dezembro de 2023. Disponível em: https://legisla.casacivil.go.gov.br/pesquisa_legislacao/103356/decreto-9710. Acesso em: 2 abr. 2026.

IPHAN. **Nota do Iphan sobre a Lei nº 15.190/2025 (Lei Geral do Licenciamento Ambiental)**. Portal GOV.BR: Sala de Imprensa. Notas e Avisos de Pauta, dez. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/iphan/pt-br/sala-de-imprensa/notas-e-avisos-de-pauta/nota-do-iphan-sobre-a-lei-no-15-190-2025-lei-geral-do-licenciamento-ambiental. Acesso em: 2 abr. 2026..

JORGE, S. J; CALIMAN, A. **Brazil's environmental rollback threatens global ecosystem services**. Ecosystem Services, v. 77, fev. 2026. Disponível em: https://10.1016/j.ecoser.2026.101813. Acesso em: 2 abr. 2026.

MILANI, F. C; BULHÕES, L; SANTIAGO, A. J. D; SCHARFENBERG, T; CARVALHO, A. P. **O Novo Marco Legal do Licenciamento Ambiental no Brasil: Uma análise crítica da gênese da Lei n. 15.190/2025 e suas implicações para a governança ambiental**. Revista Da Escola Superior Do Ministério Público Da União, 3(2), e-32001. Disponível em: https://escola.mpu.mp.br/publicacoescientificas/index.php/revista2/article/view/879. Acesso em: 2 abr. 2026.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa Copam nº 217, de 06 de dezembro de 2017**. Estabelece critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, bem como os critérios locacionais a serem utilizados para definição das modalidades de licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais no Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Publicada no Diário Oficial do Estado de Minas Gerais em 6 de dezembro de 2017. Alterada pelas Deliberações Normativas Copam nº 222, de 23 de maio de 2018; nº 235, de 25 de setembro de 2019; nº 240, de 29 de janeiro de 2021; nº 246, de 26 de maio de 2022; e nº 258, de 24 de julho de 2025. Disponível em: https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=45558. Acesso em: 2 abr. 2026.

SÁNCHEZ, L.E.; FONSECA, A. **O Novo Licenciamento Ambiental Especial: perda de rigor em troca de celeridade?**. Nota Técnica nº 01/2025. São Paulo; Ouro Preto. dez. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29521.60001. Acesso em: 2 abr. 2026.

SANTA CATARINA. **Lei Estadual nº 14.675, de 13 de abril de 2009**. Institui o Código Estadual do Meio Ambiente e estabelece outras providências. Publicada no Diário Oficial do Estado de Santa Catarina em 14 de abril de 2009. Alterada pelas Leis nº 15.133, de 19 de janeiro de 2010; nº 15.793, de 9 de abril de 2012; nº 15.815, de 8 de maio de 2012; nº 16.283, de 20 de dezembro de 2013; nº 16.342, de 21 de janeiro de 2014; nº 16.589, de 15 de janeiro de 2015; nº 16.897, de 16 de março de 2016; nº 16.940, de 24 de maio de 2016; nº 17.073, de 12 de janeiro de 2017; nº 17.075, de 12 de janeiro de 2017; nº 17.083, de 12 de janeiro de 2017; nº 17.112, de 24 de abril de 2017; nº 17.260, de 20 de setembro de 2017; nº 17.261, de 21 de setembro de 2017; nº 17.618, de 14 de dezembro de 2018; nº 17.636, de 21 de dezembro de 2018; nº 17.893, de 23 de janeiro de 2020; nº 18.031, de 1º de dezembro de 2020; nº 18.037, de 16 de dezembro de 2020; nº 18.091, de 29 de janeiro de 2021; nº 18.171, de 29 de julho de 2021; nº 18.211, de 21 de setembro de 2021; nº 18.350, de 27 de janeiro de 2022; nº 18.782, de 20 de dezembro de 2023; nº 18.821, de 9 de janeiro de 2024; nº 18.948, de 17 de junho de 2024; nº 18.973, de 11 de julho de 2024; nº 19.014, de 24 de julho de 2024; nº 19.291, de 24 de abril de 2025; nº 19.294, de 2 de maio de 2025; e nº 19.314, de 3 de junho de 2025. Disponível em: https://leis.alesc.sc.gov.br/ato-normativo/16618/compilado. Acesso em: 2 abr. 2026.

SANTA CATARINA. **Resolução Consema nº 250, de 08 de agosto de 2024**. Aprova a listagem das atividades sujeitas ao licenciamento ambiental, define os estudos ambientais necessários e estabelece outras providências. Publicada no Diário Oficial do Estado de Santa Catarina em 13 de agosto de 2024. Alterada pelas Resoluções Consema nº 259, de 15 de outubro de 2024; nº 270, de 25 de março de 2025; e nº 276, de 08 de julho de 2025. Disponível em: https://portal.doe.sea.sc.gov.br/repositorio/2024/20240813/Jornal/22330.pdf. Acesso em: 2 abr. 2026.

STEINER, Andrea. **O Uso de Estudos de Caso em Pesquisas Sobre Política Ambiental: vantagens e limitações**. Revista de Sociologia e Política, v. 19, n. 38, p. 141–158, fev. 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0104-44782011000100009. Acesso em: 2 abr. 2026.

TOCANTINS. **Resolução Coema/TO n° 07, de 09 de agosto de 2005**. Dispõe sobre o Sistema Integrado de Controle Ambiental do Estado do Tocantins. Publicada no Diário Oficial do Estado do Tocantins em 9 de setembro de 2005. Alterada pelas Resoluções Coema/TO n° 08, de 14 de dezembro de 2005; nº 88, de 05 de dezembro de 2018; e nº 120, de 04 de março de 2024. Disponível em: https://central.to.gov.br/download/42791#:~:text=O%20Licenciamento%20Simplificado%20autoriza%2C%20por,permanente%20e%20de%20pequeno%20porte. Acesso em: 2 abr. 2026.

TOCANTINS. **Lei Estadual n° 3.804, de 29 de julho de 2021**. Dispõe sobre o Licenciamento Ambiental no âmbito do Estado do Tocantins, e adota outras providências. Publicada no Diário Oficial do Estado do Tocantins em 29 de julho de 2021. Disponível em: https://www.al.to.leg.br/arquivos/lei_3804-2021_55768.PDF. Acesso em: 5 jul. 2025.

ÁGUA E ESGOTAMENTO SANITÁRIO ÀS EXIGÊNCIAS DA LEI Nº 14.026/2020 - MARCO LEGAL DO SANEAMENTO BÁSICO: ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE CRISTALINA - GO

1 Gisele Danese Maciel, 2 Camila Rodrigues de Moraes, 3 Dhênyffer Silva Rocha, 4 Aldo Muro Jr
1 Instituto Federal de Goiás - IFG, e-mail: aldo.muro@ifg.edu.br

Palavras-chave: Saneamento Básico, conformidade regulatória, análise SWOT.

Resumo

O presente trabalho avaliou a conformidade jurídico-regulatória do Termo Aditivo ao Contrato de Programa (2022), firmado entre o Município de Cristalina (GO) e a SANEAGO, à luz do Novo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020) e das Normas de Referência da ANA (NR nº 8/2024 e NR nº 9/2024). O estudo, baseado em análise documental e avaliação SWOT, identificou um cenário misto de conformidade e desafios. Em relação à NR nº 8/2024, o contrato apresenta conformidade substancial, com metas de universalização desdobradas em cronogramas anuais precisos no Plano de Gestão do Prestador: 99% de cobertura de água potável até 2027 e 90% de coleta e tratamento de esgotos até 2033. Em relação à NR nº 9/2024, verificou-se conformidade incompleta: a Cláusula Primeira do Termo Aditivo condiciona as metas operacionais de não intermitência, redução de perdas e melhoria do tratamento a normativa ainda a ser publicada, condição que cessou com a edição da NR nº 9/2024 em setembro de 2024, mas que não foi suprida por aditivo posterior. Agrava essa situação o descompasso entre o ciclo decenal de revisão do PGP, com próxima revisão prevista para 2032, e a exigência de verificação anual dos Indicadores de Nível I pela agência reguladora. Identificou-se ainda a referência à Resolução ANA nº 106/2021, já revogada, como base normativa dos indicadores de desempenho. A grande oportunidade reside no fato de que a adequação às normas da ANA é condição legal para o acesso a recursos públicos federais. A principal ameaça é o risco de restrição a financiamentos e de sanções regulatórias decorrentes da ausência dos Indicadores de Nível I nos instrumentos contratuais vigentes. Propõem-se três adequações prioritárias: a celebração de novo Termo Aditivo para incorporar os Indicadores de Nível I; a revisão extraordinária do PGP para compatibilizar seu ciclo de atualização com a verificação anual exigida pela NR nº 9/2024; e a atualização das referências normativas do PGP. Conclui-se que a adequação proposta não demanda reestruturação contratual profunda, mas sim atualização pontual dos instrumentos existentes, viável por meio de aditivos de comum acordo, com vistas a garantir a plena segurança jurídica e o cumprimento das metas de universalização até 2033.

Introdução

O saneamento básico é fundamental para o bem-estar social, sendo um direito que promove a qualidade de vida, a saúde pública, a dignidade humana, a educação e a sustentabilidade ambiental (Diniz et al., 2024). O setor abrange quatro componentes essenciais: abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas (Heinen, 2022).

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SINISA) e do Instituto Trata Brasil (2025), cinco anos após a promulgação do Marco Legal do Saneamento o Brasil registrou avanços significativos na prestação dos serviços de água e esgoto, mas ainda distantes das metas de universalização previstas para 2033. O contexto brasileiro ainda revela deficiências significativas, com cerca de 34 milhões de pessoas sem acesso à água potável e mais de 90 milhões sem coleta de esgoto conforme o SINISA 2025, ano-base 2023 (Instituto Trata Brasil, 2025). Mantido o ritmo atual, a universalização somente será alcançada em 2070, um atraso de 37 anos em relação ao prazo estipulado (Instituto Trata Brasil, 2023).

A Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, conhecida como Novo Marco Legal do Saneamento Básico, promoveu alterações relevantes com o objetivo de impulsionar o setor em direção à universalização dos serviços e atribuiu à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) a competência para instituir normas de referência para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico (Brasil, 2020). A legislação também estabelece que o acesso a recursos públicos federais ou a contratação de financiamentos com recursos da União ou com recursos geridos ou operados por órgãos ou entidades da administração pública federal está condicionado à comprovação da adoção das normas de referência nacionais estabelecidas pela ANA, para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico (Olmos 2024; Brasil, 2020).

A Resolução ANA nº 192, de 8 de maio de 2024, que aprova a Norma de Referência nº 8/2024, dispõe sobre metas progressivas de universalização de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, indicadores de acesso e sistema de avaliação, prevendo que até 2033, 99% da população terá acesso à água tratada; e 90% ao esgotamento sanitário (Brasil, 2024). A Resolução ANA nº 211, de 19 de setembro de 2024, que aprova a Norma de Referência nº 9/2024, dispõe sobre indicadores operacionais da prestação dos serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário (Zockun; Giamundo; Ribeiro, 2022; Brasil, 2024).

Concernente aos contratos de prestação de serviços públicos de saneamento básico, a Lei nº 14.026/2020 promoveu uma mudança estrutural ao eliminar o contrato de programa como instrumento válido para novas contratações, priorizando o modelo de concessão mediante licitação (Zockun; Giamundo; Ribeiro, 2022; Brasil, 2020). Os contratos de programa firmados anteriormente à vigência da lei permanecem válidos, desde que adequados às novas exigências legais e regulatórias, como a

inclusão de metas de universalização, indicadores de desempenho e mecanismos de comprovação da capacidade econômico-financeira do prestador (Heinen, 2022; Brasil, 2020). Esse cenário cria um contexto de transição regulatória, no qual contratos concebidos sob uma lógica normativa anterior passam a ser avaliados à luz de parâmetros mais rigorosos, estabelecidos pelo Novo Marco Legal do Saneamento (Heinen, 2022).

Nesse contexto, a regulação assume papel central como instrumento de operacionalização das diretrizes legais, ao estabelecer critérios objetivos para a avaliação da prestação dos serviços, do cumprimento de metas e da conformidade contratual. A atuação regulatória passa a estar diretamente associada ao monitoramento de indicadores, à verificação do atendimento às normas de referência e à identificação de riscos regulatórios decorrentes do eventual desalinhamento entre os instrumentos contratuais vigentes e as exigências normativas atuais.

O presente trabalho delimitou-se à análise da conformidade jurídico-regulatória e dos impactos do contratos de programa e do termo aditivo ao contrato de programa firmado entre o Município de Cristalina (GO) e a SANEAGO em 2022, focando na sua adequação às novas exigências da Lei nº 14.026/2020 e das Normas de Referência da ANA (NR nº 8/2024 e NR nº 9/2024). O estudo utilizou-se como base o Plano de Gestão do Prestador (PGP) de Cristalina e o Termo Aditivo, além do Plano Municipal de Saneamento Básico de Cristalina (PMSB).

Marco regulatório do saneamento básico no Brasil: evolução e consolidação da regulação pela ANA

Historicamente, a prestação e gestão dos serviços de saneamento, no início do século XX, estiveram a cargo da iniciativa privada, mas essa atuação durou pouco devido à questionável qualidade do serviço, levando o poder público a assumir a responsabilidade e iniciar a municipalização (Côrtes; Riani; Resende, 2024; Vilarinho; Couto, 2023). O ponto de partida da Política Nacional de Saneamento foi instituído durante os anos 70 com a criação do Plano Nacional de Saneamento (PLANASA) e do Sistema Financeiro do Saneamento (SFS), caracterizados por uma forte centralização no governo federal (Côrtes; Riani; Resende, 2024; Vilarinho; Couto, 2023). Apesar de seu nome, o PLANASA cuidou somente do abastecimento de água e de esgotamento sanitário (Vilarinho; Couto, 2023).

Com a promulgação da Constituição de 1988, houve uma redefinição do papel do Estado, com ênfase na descentralização e na concessão de serviços à iniciativa privada. A Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007 (Lei do Saneamento Básico) foi uma resposta à necessidade de normatização específica, estabelecendo princípios, exigindo Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB) e definindo o papel das agências reguladoras (Leite; Moita Neto; Bezerra, 2022; Côrtes; Riani; Resende, 2024). Contudo, o marco não conseguiu atrair investimentos privados de forma sólida, em grande parte devido à prevalência dos contratos de programa de longo prazo e à dispersão regulatória entre múltiplas agências infranacionais (Côrtes; Riani; Resende, 2024; Brasil, 2021). Consequentemente, a universalização dos serviços não foi alcançada; em 2018, por exemplo, o tratamento de esgoto atendia apenas 46,3% dos esgotos gerados (Côrtes; Riani; Resende, 2024).

O reflexo do histórico do saneamento no Brasil são os dados do SNIS 2021, no qual as diferenças regionais são alarmantes. Nas macrorregiões Norte e Nordeste, os índices de atendimento com água eram de 58,9% e 74,9%, respectivamente, muito inferiores aos do Centro-Oeste, Sul e Sudeste (acima de 90%) (Brasil, 2021; Olmos, 2024). Os menores índices de tratamento de esgoto gerado também são identificados no Norte e Nordeste. Em 2019, o esgotamento sanitário apresentava o pior índice de acesso, com cerca de 17,3 milhões de domicílios sem acesso à rede coletora ou fossa séptica (Brasil, 2021).

A regulação no setor de saneamento é vista como a atuação do Estado com o objetivo de proteger o interesse público, disciplinando, organizando e orientando a prestação dos serviços (Brasil, 2021). Essa atividade deve incorporar dimensões econômicas, técnicas e sociais (Heinen, 2022). A titularidade dos serviços de saneamento básico é majoritariamente dos Municípios e do Distrito Federal, sendo o titular do serviço responsável por definir a entidade que exercerá a regulação e a fiscalização da prestação (Heinen, 2022; Leite; Moita Neto; Bezerra, 2022; Olmos, 2024).

O setor de saneamento básico é complexo e historicamente passou por significativas transformações em seu modelo de prestação e regulação (Vilarinho; Couto, 2023; Côrtes; Riani; Resende, 2024). O marco regulatório no Brasil tem sido objeto de profundas discussões e mudanças estruturais, especialmente devido ao diagnóstico de que a insuficiência de investimentos no setor só poderia ser superada com a ampliação da participação da iniciativa privada (Côrtes; Riani; Resende, 2024; Leite; Moita Neto; Bezerra, 2022). Diferente de setores como energia ou telecomunicações, onde a regulação é centralizada na União, o saneamento possui um sistema multifacetado e pulverizado (Heinen, 2022; Silva; Oliveira; Guillen, 2022). Essa fragmentação gera o que a teoria da regulação define como assimetria regulatória, caracterizada por uma diversidade de estilos, processos e agências infranacionais que elevam os custos de transação e a insegurança jurídica para o investimento (Olmos, 2024; Zockun; Giamundo; Ribeiro, 2022). O diagnóstico governamental que fundamentou o Novo Marco Legal (Lei nº 14.026/2020) indicou que a insuficiência histórica de investimentos só poderia ser superada com a ampliação da participação privada (Côrtes; Riani; Resende, 2024; Leite; Moita Neto; Bezerra, 2022). Essa pulverização regulatória e a baixa capacidade de governança das agências infranacionais contribuem para a insegurança jurídica e para a falta de investimentos maciços no setor (Leite; Moita Neto; Bezerra, 2022).

Os pilares da nova lei de saneamento incluem a definição de metas claras de universalização, o incentivo à concorrência com a proibição de novos contratos de programa (instrumento pelo qual um ente federativo transfere a outro a execução de serviços), o fortalecimento da segurança jurídica nos processos de desestatização, o estímulo à regionalização dos serviços e a atribuição de um papel central à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) na regulação do setor (Heinen, 2022; Instituto Trata Brasil, 2025; Zockun; Giamundo; Ribeiro, 2022). Ademais, busca-se fomentar a estruturação de um ambiente mais atrativo para investimentos, promovendo a expansão da cobertura dos serviços básicos (Heinen, 2022; Silva; Oliveira; Guillen, 2022).

Em termos de contratos e formas de prestação, o serviço público pode ser prestado centralizadamente, diretamente pelo município, ou de forma descentralizada. A descentralização pode ocorrer por outorga, criação de entidades da administração indireta, como autarquias ou empresas estatais, ou por delegação ou colaboração, execução por particular via licitação e contrato de concessão (Heinen, 2022; Brasil, 1988).

Nesse cenário de fragmentação regulatória e déficit histórico de universalização, a Lei nº 14.026/2020 buscou superar a pulverização do sistema atribuindo à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) um papel central na uniformização da regulação setorial. A ANA passa a funcionar como ente articulador nacional, com competência para editar normas de referência de observância obrigatória pelas entidades reguladoras infranacionais, condicionando inclusive o acesso a recursos públicos federais à comprovação de sua adoção (Heinen, 2022; Brasil, 2020).

Normas de Referência da ANA e a uniformização regulatória

O artigo 1º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, com a redação conferida pela Lei nº 14.026/2020, atribuiu à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) a competência para instituir normas de referência voltadas à regulação dos serviços públicos de saneamento básico, além de estabelecer regras para sua atuação, para sua estrutura administrativa e para suas fontes de recursos (Cerqueira, 2024; Brasil, 2000; Brasil, 2020).

Para viabilizar a universalização até 2033, ainda são necessários investimentos da ordem de R$451 bilhões, com necessidade anual de R$45,1 bilhões, equivalente a R$223,82 por habitante ao ano (Instituto Trata Brasil, 2025). Contudo, iniciativas em andamento, como projetos de concessão já em curso e outros em fase de estruturação, têm potencial para beneficiar mais de 115 milhões de pessoas, representando 54,3% da população brasileira (Instituto Trata Brasil, 2025).

A Resolução ANA nº 192/2024, aprovada pela Norma de Referência nº 8/2024, dispõe sobre metas progressivas de universalização, indicadores de acesso e sistema de avaliação para o abastecimento de água e esgotamento sanitário (Brasil, 2024). Esta Norma de Referência se aplica, entre outros, à prestação de serviços realizada por meio de contratos de programa firmados diretamente, sem licitação, sob a vigência da Lei nº 11.107, de 2005 (Heinen, 2022; Brasil, 2024). Contudo, ela não se aplica a contratos de concessão já vigentes resultantes de licitações ou desestatizações cujos editais foram publicados antes da sua entrada em vigor (Heinen, 2022; Brasil, 2024). A norma estabelece que as metas de universalização devem ser avaliadas em âmbito municipal ou distrital, ou regionalizado, e busca a integralidade dos serviços de abastecimento de água potável e esgotamento sanitário (Heinen, 2022; Brasil, 2024).

Já a Norma de Referência nº 9/2024, aprovada pela Resolução ANA nº 211/2024, tem como objetivo estabelecer indicadores operacionais para a prestação dos serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário, focando nos padrões de qualidade e eficiência (Silva; Oliveira; Guillen, 2022; Brasil, 2024). Esta norma exige a adoção obrigatória dos Indicadores de Nível I pela entidade reguladora infranacional (Brasil, 2024).

Apesar da base sólida da nova legislação, a consolidação da regulação pela ANA e a efetivação da nova convenção otimista sobre o investimento privado ainda enfrentam desafios (Zockun; Giamundo; Ribeiro, 2022). Em 2024, a ANA ainda estava em fase de elaboração de muitos documentos normativos (como os critérios de contabilidade regulatória), e a multiplicidade de normativos infranacionais continua a gerar insegurança jurídica (Zockun; Giamundo; Ribeiro, 2022). Além disso, a criação dos blocos regionais pelos estados, essencial para dar escala às concessões, não tem sido pacífica (Côrtes; Riani; Resende, 2024).

Esses desafios de implementação se manifestam de forma concreta nos arranjos regulatórios infranacionais, onde agências estaduais e contratos herdados do modelo anterior precisam ser adaptados às novas exigências normativas em um contexto de capacidade institucional heterogênea. É nesse cenário que se insere o modelo regulatório do saneamento básico no estado de Goiás, analisado na seção seguinte.

Contextualização Institucional e Territorial. Saneamento Básico no Estado de Goiás

No âmbito do Estado de Goiás, a atuação regulatória é exercida por quatro entidades: a Agência Goiana de Regulação, Controle e Fiscalização de Serviços Públicos (AGR), a Agência de Regulação de Goiânia (AR), a Agência de Regulação dos Serviços Públicos de Saneamento Básico (AMAE) e a Agência de Regulação do Município de Anápolis (ARM). Essas agências detêm a atribuição de regular, controlar e fiscalizar a prestação dos serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário, conforme previsto em seus respectivos atos constitutivos e na legislação. A prestação de serviços de saneamento no estado é predominantemente realizada pela Saneamento de Goiás S.A. — SANEAGO, seguindo o modelo histórico brasileiro de gestão regionalizada por sociedades de economia mista estaduais (Côrtes; Riani; Resende, 2024). No município de Cristalina, a prestadora dos serviços de água e esgoto é a SANEAGO, tendo como reguladora a AGR.

O modelo regulatório infranacional, como o de Goiás, opera em um contexto que, historicamente, foi marcado por ser multifacetado e descentralizado, o que gerava uma alta assimetria regulatória no Brasil (Guimarães; Carvalho, 2020; Côrtes; Riani; Resende, 2024). No início do século XX, a prestação dos serviços era predominantemente privada, migrando posteriormente para uma fase de municipalização apoiada pelo governo federal (Côrtes; Riani; Resende, 2024). O Novo Marco Legal do Saneamento Básico buscou superar essa pulverização regulatória e a baixa capacidade de governança das agências infranacionais, que contribuíam para a insegurança jurídica e a falta de investimentos maciços no setor (Côrtes; Riani; Resende, 2024; Zockun; Giamundo; Ribeiro, 2022).

A base legal do saneamento no estado é composta pela Lei Estadual nº 14.939, de 15 de setembro de 2004, que dispõe sobre o Marco Regulatório da Prestação de Serviços de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário; pela Lei nº 19.453, de

16 de setembro de 2016, que institui a Política Estadual de Saneamento Básico; e pelo Decreto nº 6.276, de 17 de outubro de 2004, que regulamenta a Lei nº 14.939/2004 e cria o Conselho Estadual de Saneamento (CESAN). Esse arcabouço normativo estadual opera subordinado às diretrizes do Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020), que atribuiu à ANA a competência para editar normas de referência de observância obrigatória pelos titulares dos serviços e pelas demais entidades reguladoras, incluindo a AGR (Brasil, 2021). Para agências estaduais como a AGR, a adesão às normas de referência da ANA é condição para que os municípios sob sua regulação acessem recursos públicos federais e financiamentos da União (Heinen, 2022). No que tange à regionalização, o Novo Marco Legal incentivou a criação de blocos de municípios para a prestação integrada dos serviços, visando ganhos de escala e viabilidade econômica, sendo que Goiás já havia instituído dois blocos para a prestação regionalizada conforme dados de 2021 (Brasil, 2021).

A evolução do saneamento em Goiás reflete os ciclos de planejamento nacional, tendo seu primeiro impulso significativo com a transferência da capital para Goiânia na década de 1930 (Sacho; Hora, 2017). Contudo, a estruturação moderna do setor ocorreu sob a influência do Plano Nacional de Saneamento (PLANASA) na década de 60, que promoveu a estadualização dos serviços e a criação da SANEAGO em 1967 (Guimarães; Carvalho, 2020).

A distribuição dos serviços em Goiás revela disparidades regionais acentuadas (Guimarães; Carvalho, 2020). Estudos indicam que as regiões com melhores indicadores, como o Centro Goiano, são justamente aquelas que concentram a maior parte dos investimentos históricos, enquanto áreas periféricas ou municípios de menor porte enfrentam maiores carências (Guimarães; Carvalho, 2020; Sacho; Hora, 2017). O desafio atual reside em integrar a eficiência operacional da SANEAGO com as novas exigências de regionalização e as normas de desempenho da ANA, visando garantir a sustentabilidade econômica e social do setor em todo o território goiano.

Unidade de análise: Município de Cristalina – GO

Cristalina é um município brasileiro situado no estado de Goiás, pertencente à Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno. Localiza-se na microrregião do Entorno de Brasília, dentro da mesorregião Leste Goiano, com área territorial de 6.153,921 km² e população estimada de 65.705 habitantes (IBGE, 2024). O município ocupa a posição 62 entre os 246 municípios goianos no índice de desenvolvimento urbano, inserido na Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno, o que confere relevância estratégica ao seu saneamento no contexto regional (IBGE, 2024).

O diagnóstico atual do saneamento em Cristalina evidencia desafios concretos para o cumprimento das metas de universalização previstas para 2033. Segundo dados do SNIS/SINISA 2024, 24,2% da população, aproximadamente 15.917 pessoas, não possui acesso à água tratada, enquanto 61,6% dos habitantes, cerca de 40.455 pessoas, vivem em domicílios sem coleta de esgoto (Instituto Trata Brasil, 2026). O índice de esgoto tratado referido à água consumida é de 52,2%, indicando que mais da metade do esgoto gerado ainda não recebe tratamento adequado. As consequências desse déficit se manifestam diretamente na saúde pública: foram registradas 100 internações e 8 óbitos por doenças de veiculação hídrica em 2024 (Instituto Trata Brasil, 2026). É nesse contexto territorial e sanitário que se insere o Contrato de Programa nº 010/2014, firmado entre o Município de Cristalina e a SANEAGO, e seu Termo Aditivo de 2022, objetos da análise desenvolvida nas seções seguintes.

Materiais e métodos

Este trabalho adotou uma abordagem metodológica predominantemente qualitativa, com suporte de dados secundários quantitativos, para avaliar as metas de universalização e indicadores operacionais de saneamento básico, conforme exigido pelo marco regulatório federal (Gil, 2010; Creswell, 2010). A dimensão qualitativa da pesquisa envolveu revisão detalhada da legislação pertinente (Lei nº 11.445/2007, Lei nº 14.026/2020 e Norma de referência ANA nº 8/2024 e nº 9/2024). A análise SWOT foi elaborada com base nas Normas de Referência nº 8/2024 e nº 9/2024 e nos documentos contratuais de Cristalina

O processo metodológico seguiu quatro etapas, sendo elas o diagnóstico do problema, a fundamentação legal, a aplicação da análise de swot ou matriz de impacto e a elaboração de estratégias de melhoria. A metodologia adotada garantiu avaliação abrangente, combinando rigor técnico com adaptação às particularidades locais, e servindo de base para a implementação do novo marco regulatório no município, e consequentemente, no estado de Goiás.

A pesquisa foi conduzida com base exclusivamente em análise documental de caráter oficial, incluindo contratos, termos aditivos e normativos legais, adotando-se critérios previamente definidos e alinhados ao marco regulatório vigente. Ressalta-se que o estudo buscou identificar e sistematizar, por meio da análise SWOT, aspectos relacionados a forças, fraquezas, oportunidades e ameaças observados a partir da conformidade de instrumentos contratuais à luz da legislação aplicável. Dessa forma, adotou-se uma abordagem analítica estruturada, fundamentada em critérios objetivos e no marco regulatório vigente.

Análise de Conformidade Jurídico-Regulatória

Análise comparativa entre cláusulas do contrato vigente e exigências da Lei nº 14.026/2020

O Termo Aditivo, assinado pelo Município de Cristalina e pela Saneamento de Goiás S.A. (SANEAGO), em 31 de março de 2022, funciona como um instrumento de adequação direta às novas regras impostas pela Lei nº 14.026/2020 (Cristalina, 2022). Sua Cláusula Primeira incorpora explicitamente as metas de universalização de 99% de cobertura de água potável até 2027 e 90% de coleta e tratamento de esgotos até 2033, nos termos do art. 11-B da Lei Federal nº 11.445/2007, com redação dada pela Lei nº 14.026/2020 (Cristalina, 2022). Os considerandos do instrumento registram a comprovação de capacidade econômico-financeira da SANEAGO junto ao ente regulador, conforme exigido pelo art. 10-B da Lei Federal nº 11.445/2007 e pelo Decreto Federal nº 10.710/2021, ainda que à época da assinatura a AGR não houvesse expedido norma específica para esse

procedimento no Estado de Goiás (Cristalina, 2022). A Cláusula Sexta estabelece a matriz de alocação de riscos, com 40 itens distribuídos entre SANEAGO, Município e responsabilidades compartilhadas, elemento central do novo marco legal (Cristalina, 2022). A Cláusula Sétima institui o repasse de 3% do faturamento arrecadado ao Fundo Municipal de Saneamento Básico, reforçando o compromisso com o financiamento das ações de universalização (Cristalina, 2022).

A Lei nº 14.026/2020 trouxe mudanças significativas em relação aos contratos de programa, vedando expressamente a formalização de novos contratos dessa categoria para a prestação de serviços públicos de saneamento básico (Côrtes; Riani; Resende, 2024; Silva; Oliveira; Guillen, 2022; Brasil, 2020). Apesar da vedação para novas formalizações, o Contrato de Programa nº 010/2014, firmado entre o Município de Cristalina e a SANEAGO em 7 de fevereiro de 2014, permanece válido por ter sido celebrado antes de 15 de julho de 2020, data de publicação da Lei nº 14.026/2020, nos termos do art. 10, §3º, da Lei Federal nº 11.445/2007 (Cristalina, 2014; Heinen, 2022; Brasil, 2020). Por fim, a vigência do contrato original estende-se até 2044, o que exige governança técnica e jurídica contínua para manter a conformidade com as normas de referência da ANA ao longo das próximas décadas

Análise da aderência à Norma de Referência nº 8/2024

A Norma de Referência nº 8/2024 detalha os aspectos a serem observados para o atingimento das metas de universalização de abastecimento de água e esgotamento sanitário, conforme o art. 11-B da Lei nº 11.445/2007, com a redação dada pela Lei nº 14.026/2020 (Brasil, 2024; Brasil, 2020; Brasil, 2007).

O Termo Aditivo de Cristalina já se alinha às metas obrigatórias estabelecidas pelo art. 11-B, que exigem o atendimento de 99% da população com água potável e 90% com coleta e tratamento de esgotos até 31 de dezembro de 2033 (Cristalina, 2022; Brasil, 2020; Brasil, 2024). O Plano de Gestão do Prestador (PGP), incorporado como Anexo I ao Termo Aditivo, desdobra essas metas em cronogramas anuais precisos. Para o abastecimento de água, a progressão parte de 92% no Ano 1 (2022) e atinge 99% no Ano 6 (2027), mantendo esse índice até o Ano 23 (2044); para o esgotamento sanitário, a evolução parte de 42,31% no Ano 1 (2022), com progressão até 90% no Ano 12 (2033), percentual a ser mantido até o término do contrato (Cristalina, 2022). Esse nível de detalhamento representa conformidade efetiva com a NR nº 8/2024, que exige metas progressivas com avaliação em âmbito municipal (Brasil, 2024). Excepcionalmente, a Norma permite a dilação do prazo para 1º de janeiro de 2040, caso estudos de licitação de prestação regionalizada demonstrem a inviabilidade econômico-financeira de atingir o prazo inicial, exigindo a anuência prévia da entidade reguladora infranacional e a observância da modicidade tarifária (Brasil, 2024).

Para monitoramento, a NR nº 8/2024 exige a adoção e o cálculo de Indicadores de Cobertura e Atendimento: o Índice de Atendimento de Abastecimento de Água (IAA), o Índice de Cobertura de Abastecimento de Água (ICA), o Índice de Atendimento de Esgotamento Sanitário (IAE) e o Índice de Cobertura de Esgotamento Sanitário (ICE), avaliados abrangendo todo o território municipal e desagregados por contrato (Cerqueira; Ribeiro, 2024; Brasil, 2024). O Município de Cristalina, como titular dos serviços, é obrigado a elaborar ou atualizar o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) com metas e indicadores de desempenho compatíveis com a universalização, devendo os contratos celebrados antes da publicação do plano atualizado incorporar essas metas por meio de termo aditivo de comum acordo, com avaliação da reguladora e preservação do equilíbrio econômico-financeiro (Cerqueira; Ribeiro, 2024; Brasil, 2024).

A conformidade com a NR nº 8/2024, portanto, é substancial no que se refere às metas de cobertura. A limitação reside na ausência de mecanismos contratuais explícitos de monitoramento periódico compatíveis com a exigência de verificação anual dos indicadores de cobertura e atendimento prevista na referida norma. Adicionalmente, a NR nº 8/2024 estabelece a responsabilidade do titular ou da entidade reguladora de definir prazo não superior a um ano para que os usuários conectem suas edificações à rede de esgotos disponível, procedimento que deve ter sido aplicado a todas as edificações em áreas cobertas por esgotamento sanitário até 31 de dezembro de 2025 (Vilarinho; Couto, 2023; Brasil, 2024).

Análise da aderência à Norma de Referência nº 9/2024

Com base na Resolução ANA nº 211, de 19 de setembro de 2024, que aprova a Norma de Referência nº 9/2024, o contrato de Cristalina deve se adequar principalmente aos Indicadores de Nível I e às metas progressivas a eles associadas (Heinen, 2022; Olmos, 2024; Zockun; Giamundo; Ribeiro, 2022; Brasil, 2024). A NR nº 9/2024 define esses indicadores como de adoção obrigatória pela entidade reguladora infranacional, devendo ser incluídos nos instrumentos contratuais (Brasil, 2024). Os Indicadores de Nível I obrigatórios incluem: Nível I-01 — Índice de perdas de água na distribuição por ligação; Nível I-02 — Índice das análises de coliformes totais da água no padrão estabelecido; Nível I-03 — Índice das análises de DBO do esgoto na saída do tratamento; e Nível I-04 e Nível I-05 — Índices de intermitência dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário (Cerqueira; Ribeiro, 2024; Brasil, 2024).

A análise documental evidencia, contudo, que esses indicadores estão normativamente exigidos, mas contratualmente indefinidos. A Cláusula Primeira do Termo Aditivo estabelece que as metas quantitativas de não intermitência do abastecimento, de redução de perdas e de melhoria dos processos de tratamento serão estabelecidas com base nos critérios técnicos da ANA, em normativa ainda a ser publicada (Cristalina, 2022). Essa condição suspensiva, justificável à época da assinatura em março de 2022, perdeu sua razão de ser com a publicação da NR º 9/2024, e o contrato ainda não foi atualizado para incorporá-la.

A situação de descompasso temporal estrutural presente na a Seção 4 do PGP que estipula revisões no máximo, a cada 10 anos a contar da assinatura do presente plano, condicionando-as à revisão prévia do PMSB, projeta a próxima revisão ordinária para 2032 (Cristalina, 2022). A NR nº 9/2024 exige verificação anual das metas dos Indicadores de Nível I pela agência reguladora, em um intervalo de cinco anos, sendo necessário que as metas sejam cumpridas em pelo menos três desses anos, com a primeira

fiscalização ocorrendo ao término do quinto ano de vigência do contrato (Brasil, 2024). Há, portanto, uma incompatibilidade direta entre o ciclo decenal de revisão do instrumento de planejamento e o ciclo anual de verificação exigido pela norma.

Identificou-se ainda uma inconsistência normativa relevante, o PGP referência em múltiplos pontos a Resolução ANA nº 106/2021 como base para os indicadores de desempenho (PGP, Seções 3.1, 3.3), normativo que foi revogado pelas NRs nº 8/2024 e nº 9/2024. Isso fragiliza a segurança jurídica do instrumento e exigirá atualização formal das referências normativas.

O contrato de Cristalina deve garantir a preservação do equilíbrio econômico-financeiro caso novas metas ou revisões sejam incluídas após a contratação, o que só será eficaz com a assinatura de Termo Aditivo de comum acordo entre as partes (Cristalina, 2022; Heinen, 2022; Zockun; Giamundo; Ribeiro, 2022; Brasil, 2024). Por fim, o contrato deve ser formalmente atualizado para incluir as metas progressivas anuais para cada um dos Indicadores de Nível I, garantindo a conformidade com a Resolução ANA nº 211/2024 (Cerqueira; Ribeiro, 2024; Cristalina, 2022; Brasil, 2024).

Matriz SWOT de Risco. Análise SWOT

Com base nas informações e análises dos documentos, apresenta-se a análise SWOT do contrato especificamente em relação às exigências da Resolução ANA nº 192/2024 e Resolução ANA nº 211/2024 (Nakagawa, 2011).



Figura 1. Resultados da Análise de SWOT. Fonte: Elaborado pelos autores, 2026; Nakagawa, 2011.

A análise SWOT do Termo Aditivo ao Contrato de Programa entre o Município de Cristalina e a SANEAGO, à luz da Resolução ANA nº 211/2024 (NR 9/2024) e Resolução nº 192/2024 (NR 8/2024), revela um panorama misto de conformidade e desafios. A oportunidade central reside em usar o novo marco regulatório para aprimorar a gestão e a prestação dos serviços.

Entre os pontos fortes identificados, destacam-se a incorporação explícita das metas de universalização com cronogramas anuais precisos no PGP (Seções 3.1.1 e 3.1.2), a matriz de alocação de riscos com 40 itens estruturados na Cláusula Sexta do Termo Aditivo, as cláusulas de equilíbrio econômico-financeiro e a previsão do Fundo Municipal de Saneamento Básico na Cláusula Sétima (Cristalina, 2022). As fraquezas decorrem diretamente das lacunas documentais identificadas: a Cláusula Primeira do Termo Aditivo condiciona as metas operacionais de não intermitência, redução de perdas e melhoria do tratamento a normativa ainda a ser publicada, condição que cessou com a edição da NR nº 9/2024 em setembro de 2024, mas que ainda não foi suprida por um aditivo posterior (Cristalina, 2022); o PGP referência a Resolução ANA nº 106/2021, já revogada, em suas Seções 3.1 e 3.3; e o ciclo decenal de revisão do PGP é incompatível com a verificação anual dos Indicadores de Nível I exigida pela NR nº 9/2024 (Cristalina, 2022; Brasil, 2024).

As oportunidades residem no fato de que a adequação às normas da ANA é condição legal para o acesso a recursos públicos federais, representando incentivo concreto e imediato para a atualização dos instrumentos (Heinen, 2022; Brasil, 2020). As ameaças mais relevantes são o risco de restrição ao acesso a financiamentos federais e a exposição a sanções regulatórias decorrentes da ausência dos Indicadores de Nível I nos instrumentos contratuais vigentes.

Concisamente, enquanto o contrato de Cristalina já demonstra alinhamento substancial com as metas de universalização exigidas pela NR nº 8/2024, a persistência da condição suspensiva da Cláusula Primeira do Termo Aditivo, não atualizada após a publicação da NR nº 9/2024, e o descompasso entre o ciclo de revisão do PGP e as exigências de monitoramento anual representam os principais desafios para a plena conformidade regulatória e a preservação do acesso a financiamentos.

Resultados e discussão

A análise de conformidade jurídico-regulatória foi realizada com base documental descrita na metodologia, tendo seus resultados sistematizados por meio da análise SWOT. Os resultados evidenciam níveis distintos de aderência entre os elementos contratuais examinados, configurando um cenário de adequação em curso, no qual coexistem avanços normativos relevantes e lacunas concretas na internalização das exigências regulatórias supervenientes.

No que se refere à Norma de Referência nº 8/2024, constata-se aderência substancial no plano das metas quantitativas. Entretanto, a conformidade encontra limite na ausência de mecanismos contratuais explícitos de monitoramento periódico compatíveis com a exigência de verificação anual dos indicadores de cobertura e atendimento prevista na referida norma, o que compromete a operacionalização do acompanhamento ao longo do horizonte contratual.

Em relação à Norma de Referência nº 9/2024, verifica-se maior fragilidade na sua incorporação, evidenciada de forma direta pela própria redação do Termo Aditivo. A Cláusula Primeira estabelece que as metas quantitativas de não intermitência do abastecimento, de redução de perdas e de melhoria dos processos de tratamento serão estabelecidas com base nos critérios técnicos da ANA, em normativa ainda a ser publicada (Cristalina, 2022). Essa condição suspensiva, justificável à época da assinatura em março de 2022, perdeu sua razão de ser com a publicação da Resolução ANA nº 211, de 19 de setembro de 2024. O PGP reitera essa pendência nas Seções 3.2, 3.3.4, 3.3.5 e 3.3.6, todas remetendo à mesma condição de norma ainda a ser publicada (Cristalina, 2022). Agrava essa situação o descompasso temporal estrutural entre o PGP, com revisões previstas a cada dez anos, próxima em 2032, e a verificação anual dos Indicadores de Nível I exigida pela NR nº 9/2024, que requer que as metas sejam cumpridas em pelo menos três dos cinco anos verificados (Brasil, 2024). Identificou-se ainda que o PGP cita em múltiplos pontos a Resolução ANA nº 106/2021 como base para os indicadores de desempenho (Cristalina, 2022), normativo revogado pelas NRs nº 8/2024 e nº 9/2024, o que fragiliza a segurança jurídica do instrumento.

A análise demonstra que o contrato do município de Cristalina-GO apresenta nível intermediário de aderência ao marco regulatório vigente: conformidade substancial com a NR nº 8/2024 no que se refere às metas de universalização, e conformidade ainda incompleta com a NR nº 9/2024 quanto aos indicadores operacionais, cujas metas e metodologias de cálculo permanecem contratualmente indefinidas. A ausência de metas progressivas anuais para os Indicadores de Nível I limita a capacidade da AGR de realizar o acompanhamento sistemático do desempenho da SANEAGO nos critérios de perdas, qualidade da água tratada, qualidade do esgoto tratado e continuidade do abastecimento, dimensões distintas da extensão do atendimento, que as metas de cobertura do PGP não suprem.

Dados nacionais corroboram essa perspectiva: municípios com contratos em situação irregular investem em média R$53,63 por habitante, menos de um quarto do valor estipulado pelo PLANSAB para a universalização (R$223,82), e registram índice de perdas na distribuição de 46,24%, significativamente superior aos 37,13% verificados em contratos regulares (Instituto Trata Brasil, 2025; SINISA, 2023), evidenciando que a conformidade regulatória tem impacto direto sobre a eficiência operacional e o volume de investimentos.

Conclusões

A implementação das metas de universalização em Cristalina revela um descompasso estrutural entre a urgência regulatória e a longevidade dos instrumentos contratuais herdados. Embora o município tenha cumprido o requisito do art. 11-B da Lei nº 11.445/2007 ao formalizar o Termo Aditivo em 31 de março de 2022, o Contrato de Programa original permanece juridicamente amparado até 2044. Enquanto a lei impõe o atingimento de 99% para água e 90% para esgoto até 31 de dezembro de 2033, o PGP estabelece que esses percentuais devem ser mantidos pela SANEAGO durante os onze anos remanescentes de contrato, do Ano 12 ao Ano 23 (Cristalina, 2022). Esse período exige monitoramento contínuo dos Indicadores de Nível I, atualmente indefinidos no instrumento contratual, evidenciando que a adequação formal via aditivo obrigatório pode resultar em conformidade incompleta, o compromisso de 2033 corre o risco de tornar-se uma promessa meramente documental sem os instrumentos de verificação adequados (Brasil, 2024).

Diante das lacunas identificadas, propõem-se três adequações prioritárias. Primeiro, a celebração de novo Termo Aditivo para incorporar formalmente as metas progressivas anuais dos Indicadores de Nível I previstos na NR nº 9/2024, suprindo a condição suspensiva da Cláusula Primeira do Termo Aditivo de 2022. Segundo, a revisão extraordinária do PGP para compatibilizar seu ciclo de atualização com a exigência de verificação anual dos indicadores pela AGR, sem aguardar o prazo decenal ordinário fixado na Seção 4 do instrumento. Terceiro, a atualização das referências normativas do PGP para substituir as citações à Resolução ANA nº 106/2021 pelas NRs nº 8/2024 e nº 9/2024, garantindo segurança jurídica ao instrumento de planejamento.

A análise SWOT corrobora esse cenário ao evidenciar a coexistência de avanços institucionais, cronogramas anuais de universalização, matriz de riscos com 40 itens, cláusulas de equilíbrio econômico-financeiro e Fundo Municipal de Saneamento Básico, e lacunas estruturais decorrentes da incorporação incompleta das exigências operacionais das Normas de Referência. A adequação proposta não demanda reestruturação contratual profunda, mas sim atualização pontual e específica dos instrumentos existentes, viável mediante celebração de aditivos de comum acordo entre as partes, com avaliação da reguladora e preservação do equilíbrio econômico-financeiro, nos termos do art. 11-B da Lei nº 11.445/2007 (Brasil, 2007; Brasil, 2024).

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer o Instituto Federal de Goiás – IFG e o CNPq pelo apoio recebido.

Referências bibliográficas

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Resolução ANA Nº 192, de 8 de maio de 2024. Aprova a Norma de Referência nº 8/2024, que dispõe sobre metas progressivas de universalização de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, indicadores de acesso e sistema de avaliação. Disponível em :https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2024/192. Acesso em: 20 mai. 2025

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Resolução ANA Nº 211, de 19 de setembro de 2024. Aprova a Norma de Referência nº 9/2024, que dispõe sobre indicadores operacionais da prestação dos serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário. Disponível em:https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2024/211.
Acesso em: 20 mai. 2025

BRASIL. Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh) e responsável pela instituição de normas de referência para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9984.htm. Acesso em: 11 jun. 2025.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico. Brasil, 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 20 mai. 2025.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Novo Marco Legal do Saneamento Básico. Brasil, 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 20 mai. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. Panorama do Saneamento Básico no Brasil 2021. Brasília: SNS/MDR, 2021.

CERQUEIRA, M. C.s; RIBEIRO, J. G. de S. Avaliação de desempenho de serviços de água e esgoto no Brasil: análise da participação social na elaboração de norma de referência. Revista Caderno Pedagógico, Curitiba, v. 21, n. 1, p. 1893-1911, 2024.

CÔRTES, L. de S.; RIANI, J. de L. A.; RESENDE, M. F. da C. Conventions, private investment and basic sanitation in Brazil. Brazilian Keynesian Review, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 45-67, 1. sem. 2024.

CRESWELL, J. W. Projeto de Pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.
CRISTALINA (GO). Contrato nº 010/2014: contrato de programa de prestação de serviços públicos e exploração de serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário. Cristalina: Prefeitura Municipal, 2014.

CRISTALINA (GO). Plano Municipal de Saneamento Básico: Produto D: relatório de prospectiva e plano estratégico. Cristalina: Prefeitura Municipal, 2017.

CRISTALINA (GO). Termo aditivo ao contrato de programa firmado entre o Município de Cristalina e a Saneago em função da incorporação das metas estabelecidas pelo art. 11-B da Lei Federal nº 11.445/2007. Cristalina: Prefeitura Municipal, 2022.

DINIZ, C. L. F. et al. Novo marco do saneamento básico: sua relação com a saúde pública e meio ambiente. Revista Concilium, [s. l.], v. 17, n. 7, p. 322-341, 2024

GADELHA, H. S. et al. O novo marco regulatório do saneamento básico e o direito ao acesso à água. Research, Society and Development, [s. l.], v. 10, n. 11, e569101118843, 2021. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v10i11.18843

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GOIÁS. Decreto nº 6.276, de 17 de outubro de 2004. Regulamenta a Lei nº 14.939, de 15 de setembro de 2004, e cria o Conselho Estadual de Saneamento (CESAN). Diário Oficial do Estado de Goiás, Goiânia, 2004. Disponível em: https://legisla.casacivil.go.gov.br/pesquisa_legislacao/61016/decreto-6276. Acesso em: 11 abr. 2026.

GOIÁS. Lei nº 14.939, de 15 de setembro de 2004. Dispõe sobre o marco regulatório da prestação de serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário no Estado de Goiás. Diário Oficial do Estado de Goiás, Goiânia, 2004. Disponível em: https://legisla.casacivil.go.gov.br/pesquisa_legislacao/80874/lei-14939. Acesso em: 11 abr. 2026.

GOIÁS. Lei nº 19.453, de 16 de setembro de 2016. Institui a Política Estadual de Saneamento Básico. Diário Oficial do Estado de Goiás, Goiânia, 2016. Disponível em: https://legisla.casacivil.go.gov.br/api/v2/pesquisa/legislacoes/98769/pdf. Acesso em: 11 abr. 2026.

GUIMARÃES, Patrick Souto; CARVALHO, Claudia Regina Rosal. Saneamento básico goiano: uma proposta de intervenção regulatória para o aumento da eficiência e eficácia dos serviços oferecidos à população. Gestão & Regionalidade - Vol. 36 - Nº108- mai-ago/2020. DOI: https://doi.org/10.13037/gr.vol36n108.5391

HEINEN, J. Normas de referência da agência de águas (e saneamento básico) no Brasil a partir do novo marco legal (Lei nº 14.026/2020). Revista de Direito Administrativo, Rio de Janeiro, v. 281, n. 3, p. 215-247, set./dez. 2022.

HEINEN, J. Formas de prestação do serviço público de saneamento básico a partir da edição do novo marco legal – Lei n. 14.026/2020. Revista da AGU, Brasília-DF, v. 21, n. 02. p. 121-142, abr./jun. 2022

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Portal Cidades. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/cristalina/panorama. Acesso em: 11 mar 2026

INSTITUTO TRATA BRASIL. Avanços do Novo Marco Legal do Saneamento Básico no Brasil – 2023 (SNIS 2021): resumo executivo. [S. l.]: ITB, 2023. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2023/08/Resumo-Executivo-Avancos-do-Novo-Marco-Legal-do-Saneamento-Basico-no-Brasil-%E2%80%93-2023-SNIS-2021.pdf. Acesso em: 26 mai. 2025.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Estudo sobre os avanços do marco legal do saneamento básico no Brasil de 2025 (SINISA, 2023): [S. l.]: ITB, 2025. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2025/08/ESTUDO_COMPLETO_Avancos_do_Marco_Legal_do_Saneamento_Basico_no_Brasil_2025_FINAL.pdf. Acesso em: 10 mai. 2026.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Painel Saneamento Brasil: Cristalina. Disponível em: https://www.painelsaneamento.org.br/localidade/index?id=520620. Acesso em: 14 abr. 2026.

LEITE, C. H. P.; MOITA NETO, J. M.; BEZERRA, A. K. L. Novo marco legal do saneamento básico: alterações e perspectivas. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 27, n. 4, p. 813-818, jul./ago. 2022.

NAKAGAWA, M. FERRAMENTA: ANÁLISE SWOT (CLÁSSICO), ESTRATÉGIA E GESTÃO, Movimento Empreenda, São Paulo, 2011, 3 páginas. Disponível em: <http://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Anexos/ME_Analise-Swot.PDF>. Acesso em: 31 de mar. 2026.

OLMOS, P. C. T. Competências da União Federal frente à Lei n. 14.026/2020: a edição de normas de referência pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Revista Digital de Direito Administrativo, Ribeirão Preto, v. 11, n. 1, p. 129-158, 2024.

SACHO, Sara Duarte; HORA, Karla Emmanuela. Panorama do Saneamento Básico na Região Metropolitana de Goiânia. Desenvolvimento em Questão, v. 15, n. 41, p. 498-522, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.21527/2237-6453.2017.41.498-522.

SILVA, D. de S.; OLIVEIRA, J. C. de; GUILLEN, R. D. M. Normas de referência: ferramenta para o desenvolvimento sustentável do setor de saneamento. Brazilian Journal of Development, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 24137-24151, abr. 2022. DOI:https://doi.org/10.34117/bjdv8n4-092

VILARINHO, C. M. R.; COUTO, E. de A. do. Saneamento básico e regulação no Brasil: desvendando o passado para moldar o futuro. Revista Digital de Direito Administrativo, Ribeirão Preto, v. 10, n. 2, p. 233-257, 2023. DOI: https://doi.org/10.11606/issn.2319-0558.v10i2p233-257

ZOCKUN, M., GIAMUNDO, C., RIBEIRO, D. A. G. O novo marco legal do saneamento básico e as normas de referência da ANA: um mecanismo de fortalecimento da segurança jurídica no setor. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 8, n. 10, p. 65538-65550, out. 2022. DOI: https://doi.org/10.34117/BJDV8N10-040.

IMPACTOS DA FLEXIBILIZAÇÃO DAS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE ATRAVÉS DA LEI 14.285/2021: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE CANOINHAS

1 Leandro Silva Nizer, 2 Maristela Povaluk, 3 Maurício Schmitt

1 Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Civil, Sanitária e Ambiental (PMPECSA), Universidade do Contestado, Mafra-SC, e-mail: leandronizer@gmail.com; 2 Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Civil, Sanitária e Ambiental (PMPECSA), Universidade do Contestado, Mafra-SC, e-mail: maristela@unc.br; 3 Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Civil, Sanitária e Ambiental (PMPECSA), Universidade do Contestado, Mafra-SC, e-mail: mauricio.schmitt@unc.br

Palavras-chave: Área de preservação permanente; Estudo técnico socioambiental; Zoneamento urbano.

Resumo

As áreas de preservação permanente (APP) são fundamentais para garantir a existência dos recursos hídricos e, consequentemente, a fauna, flora e sociedade humana. Ao longo das décadas, a legislação que trata da preservação das matas ciliares ao longo de cursos hídricos passou por mudanças significativas, desde o primeiro marco ambiental, o Código Florestal de 1934, estabelecendo normas para o uso da floresta, passando pela Constituição de 1988, Política Nacional do Meio Ambiental, além do Novo Código Florestal de 2012, até chegar na sua alteração mais recente, a Lei 14.285/2021, que concede aos municípios autonomia para delimitação de áreas de preservação permanente em área urbanas consolidadas, através do estudo técnico socioambiental, que é realizado com uma equipe multidisciplinar que faz a verificação dos cursos d'água passíveis de ser aplicado a flexibilização, após serem ouvidos os conselhos municipais de meio ambiente. O estudo analisou os impactos da flexibilização na delimitação de APP's em área urbana consolidada com base na Lei n° 14.285/2021, tendo como objeto de estudo um afluente do Rio Piedade, localizado no município de Canoinhas, Santa Catarina. A metodologia adotada envolveu o levantamento de dados, análise de ortofotos históricas e aplicação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) do município de Canoinhas e Google Earth Pro, permitindo dessa forma a avaliação das transformações e a delimitação das APP's conforme diferentes cenários. Foram comparadas as faixas de preservação permanente estabelecidas pelo Código Florestal com as resultantes da flexibilização prevista na Lei n°14.285/2021, além da análise integrada dos impactos ambientais, sociais e econômicos. Os resultados evidenciaram intensa antropização da área ao longo do tempo, com redução da mata ciliar de 4.237m² em 2012 para 1.366m² em 2023, aumento de trechos canalizados e maior adensamento urbano. A flexibilização resultou em redução legal de aproximadamente 71,9% da área de APP, porém, deste montante apenas 1,5% da área estava coberta por mata ciliar em 2023. Com a premissa do reflorestamento das APP's restantes, proposto pelo estudo técnico socioambiental, a área coberta por vegetação após a aplicação do estudo, seria de 11.104m², demonstrando dessa forma que quando a legislação é aplicada de forma correta, garante aumento da flora e possibilidade de recomposição também da fauna local. No aspecto social, houve diminuição do número de imóveis em situação irregular, com potencial de regularização de 91 edificações já existentes. Já no âmbito econômico, a liberação de 8 novos lotes para construção pode gerar investimentos superiores a R$2,6 milhões, impulsionando a economia local e a arrecadação municipal. Dessa forma, a flexibilização das APP's propiciada pela aplicação da Lei 14.285/2021, associada a estudos técnicos socioambientais, quando acompanhadas de medidas compensatórias previstas na legislação supracitada, pode representar uma medida alternativa viável para conciliar a preservação ambiental e o desenvolvimento urbano em áreas já consolidadas, diminuindo dessa forma a insegurança jurídica dos proprietários e garantindo um ambiente sustentável para toda a população.

Introdução

As matas ciliares, em especial, possuem funções ambientais e ecológicas importantes para a natureza e para a humanidade, desempenhando papel fundamental na proteção dos rios e proporcionando qualidade ambiental para a fauna e flora (Panizza, 2016). Além de funcionarem como corredores de fauna entre fragmentos florestais, contribuem principalmente para fornecer localidade de moradia para grande quantidade de espécies de animais, como pássaros, mamíferos e répteis, também há concentração de várias espécies vegetais nativas conforme Castro (2017). Um dos marcos mais importantes para a preservação destes locais foi a criação do Código Florestal em 1934 através do decreto n°23.793, que estabeleceu normas para o uso e a proteção das florestas. Este código, mesmo que de forma superficial, impôs limites para o desmatamento, regulamentando a exploração sustentável desses recursos. Em 1962 uma nova versão do Código Florestal foi proposta e aprovada em 1965 através da Lei n°4.711, pois as rápidas transformações que ocorreram na agricultura e na pecuária mudaram significativamente o cenário rural do país, gerando uma pressão sobre a necessidade de proteção do meio ambiente muito maior do que a contemplada pelo Código de 1934 (Rodrigues; Matavelli, 2020, p.29). Em 1981 promulgou-se a Lei n° 6.938/81, conhecida como a Lei da Política Nacional do Meio Ambiente, definindo no seu artigo 3° o conceito de "meio ambiente" que é o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas, trazendo maior segurança jurídica à questão. Além dos referidos aspectos, instituiu o Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA), coordenador das ações ambientais em todo o país, e exigiu o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) juntamente do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), fundamentais para a avaliação de projetos que pudessem afetar o meio ambiente (Messias, 2023).

Ainda seguindo o ordenamento jurídico (Messias, 2023) posteriormente, fortalecendo ainda mais a proteção ambiental no Brasil, em alinhamento com a Lei da Política Nacional do Meio Ambiente, a Constituição de 1988 foi promulgada, nela a preocupação ambiental foi elevada a um patamar superior, destacando-a como norma fundamental (Brasil, 1988, art. 225). Já no ano de 2012, o Congresso Nacional do Brasil aprovou um novo Código Florestal, a vigente Lei n°12.651/2012 (Brasil, 2012), substituindo o compilado de 1965, este traz a figura dos Espaços Territoriais Especialmente Protegidos (ETPs), que são as áreas de proteção permanente, as áreas de reserva legal, as unidades de conservação, as áreas ambientais municipais e as áreas de uso restrito (Souza-Santos, 2023). O atual Código Florestal, traz no artigo 3°, II, a definição das Áreas de Preservação Permanente como um território protegido, independentemente da existência de cobertura vegetal nativa, que detém a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o curso gênico da fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas (Brasil, 2012). Um tópico que gera grande discussão no contexto das APP's, diz respeito à definição das faixas em áreas urbanas principalmente àquelas ditas consolidadas, tendo em vista que aplicar as mesmas restrições que o ambiente rural torna essa legislação extremamente rígida no contexto das cidades, engessando assim o desenvolvimento urbano e gerando insegurança jurídica. Desta maneira, em 2021 o Congresso Nacional aprovou a Lei 14.285/2021 dando uma maior autonomia aos municípios na flexibilização das faixas de APP em áreas urbanas consolidadas através da elaboração do estudo técnico socioambiental, que é um documento técnico-cientifico que analisa os impactos de empreendimento ou da regularização fundiária (Reurb) sobre o meio ambiente e a população local. Este integra fatores biológicos, físicos e socioeconômicos para diagnosticar a área, propor medidas mitigadoras e garantir a sustentabilidade (Santa Catarina, 2024). Cabe salientar que existem requisitos para que o local seja enquadrado como área urbana consolidada, principalmente estar incluída no perímetro urbano, dispor de sistema viário implantado, estar organizada em quadras e lotes as quais devem estar predominantemente edificados, além de dispor de no mínimo dois equipamento de infraestrutura urbana implantados, sejam eles, a drenagem de água pluviais, o esgotamento sanitário, abastecimento de água potável, distribuição de energia elétrica e iluminação pública, além de limpeza urbana, coleta e maneja de resíduos sólidos, caso a área não atenda aos requisitos acima expostos, não é possível a flexibilização das APP's (Santa Catarina, 2024). Muitas cidades viram na elaboração do estudo técnico socioambiental, uma ferramenta importante para o desenvolvimento municipal, considerando que inúmeros cursos d'água atravessam áreas centrais urbanizadas, nas quais conforme o Código Florestal (Brasil, 2012) deveria ser mantida a faixa mínima de 30 metros destinada a proteção ambiental. O objetivo central do estudo foi avaliar os impactos ambientais, sociais e econômicos decorrentes da flexibilização das Áreas de Preservação Permanente (APP's), conforme diretrizes estabelecidas pela Lei nº 14.285/2021, em um curso d'água inserido em área urbana consolidada no município de Canoinhas, Santa Catarina.

Material e método

A área de estudo compreende uma bacia hidrográfica com área de 671.234m² localizada no bairro Industrial 1 no perímetro urbano do município de Canoinhas - Santa Catarina, caracterizada pela presença de curso d'água natural antropizado e trecho canalizado, além de ocupação consolidada por loteamento (Figura 1). A seleção da área considerou critérios como a existência de ocupações em APP, disponibilidade de dados geoespaciais e relevância ambiental e urbana.

A rede de drenagem local é composta por um curso d'água principal em seção aberta, que deságua no Rio Piedade, e por trechos canalizados em seção fechada que atravessam áreas densamente urbanizadas. Observa-se a presença de nascentes, na qual a contribuição hídrica é direcionada por galerias pluviais até o canal principal.



Figura 01: Mapa com a localização do curso d'água.
Fonte: O autor (2026).

O levantamento de dados foi realizado com o uso de bases cartográficas, dados hidrológicos e topográficos, além da legislação ambiental vigente. Foram utilizadas imagens de ortofotos referente aos anos de 2012 e 2023 como registro históricos da área de estudo, obtidas através do Sistema de Informações Geográficas (SIG) da Prefeitura de Canoinhas, permitindo a análise temporal da expansão urbana e das transformações do uso e cobertura do solo. A análise espacial foi conduzida com o auxílio de SIG do município de Canoinhas e do Google Earth PRO, possibilitando a delimitação da bacia hidrográfica a partir de modelos digitais de elevação, bem como o mapeamento do curso d'água e de suas margens. As APP's foram delimitadas conforme os critérios estabelecidos no inciso I, do art. 4° do Código Florestal Brasileiro (Lei nº 12.651/2012).

Como todos os cursos d'água possuem uma largura inferior a 10m, aplicou-se um *buffer* sobre os dados da rede, aplicando a largura de 30m, sendo posteriormente identificados e quantificados os imóveis inseridos nessas faixas. Também foi realizado o mapeamento do loteamento e da evolução da ocupação urbana ao longo do tempo, permitindo uma análise espacial integrada entre ambiente natural e uso antrópico. Além dos referidos aspectos, foi realizada a delimitação da área de risco, que nesse caso são os locais sujeitos a inundação em períodos de enchente, sendo que nessa área, por ser considerada como risco alto, entende-se passível aplicar a metodologia, uma vez que a restrição se aplica apenas aos locais identificados como risco muito alto, que são aqueles que não é possível aplicar medidas mitigadoras para diminuição do risco. Paralelamente, procedeu-se ao mapeamento das funções ambientais desempenhadas pelas APP's na área de estudo, considerando aspectos como a proteção dos recursos hídricos, controle de processos erosivos, manutenção da biodiversidade, regulação do microclima e mitigação de riscos hidrológicos, como inundações e enxurradas. Essa etapa foi fundamental para compreender a relevância ambiental das áreas potencialmente afetadas pela flexibilização legal. Posteriormente, foram elaborados cenários de simulação com base na comparação entre a delimitação das APP's conforme a legislação federal vigente de 30m ambos os lados do curso d'água e cenários alternativos considerando a redução das faixas, conforme possibilidades previstas na Lei nº 14.285/2021. Posteriormente, realizou-se a análise integrada dos impactos decorrentes da flexibilização das APP's, considerando três dimensões principais: ambiental, social e econômica. No aspecto ambiental, foram avaliados possíveis aumentos da cobertura vegetal, tendo em vista que hoje ela é praticamente inexistente (veja Resultados e Discussão) e a Lei n°14.285/2021 que prevê a recomposição da vegetação das novas faixas. No âmbito social, foi realizado mapeamento e analisou-se a ocupação de áreas de risco e os efeitos sobre a qualidade de vida da população. Já sob a perspectiva econômica, foram considerados fatores como valorização imobiliária, possibilidade de novas construções e regularizações através do levantamento dos alvarás solicitados nos últimos 5 anos com a metragem total construída, chegando em uma média de área construída por lote, para verificar o potencial que será gerado com a liberação de novos locais passíveis de construção. Para definição da nova faixa de preservação considerando a flexibilização conforme Lei n°14.285/2021, foi aplicada a metodologia já aprovada pelos órgãos, como CONDEMA e Ministério Público e validada em estudos técnico socioambientais similares, baseada no cálculo entre a relação da função ambiental existente, caracterizada pela presença da mata ciliar, e o comprimento do trecho. Dessa forma, a integração entre dados de campo, geoprocessamento e simulação de cenários permitirá uma análise abrangente dos efeitos da flexibilização das APP's, fornecendo subsídios técnicos para a compreensão das implicações territoriais decorrentes da aplicação da legislação vigente.

Resultados e discussão

Através da análise das condições do afluente do Rio Piedade, considerando o histórico referente aos anos de 2012 (Figura 2.A) e 2023 (Figura 2.B), foi possível constatar transformações significativas no uso e ocupação do solo. Observa-se, no período analisado, um processo contínuo de adensamento urbano, caracterizado pela expansão de áreas construídas e pela redução de espaços livres e com vegetação. Na Figura 2.A, ainda eram identificadas porções significativas de matas ciliares e menor densidade de construções. Em contrapartida, na Figura 2.B verifica-se a ocupação mais intensa da área, com aumento inclusive da malha viária, resultando em mais superfícies impermeáveis e canalizações, comprometendo a infiltração da água no solo e contribuindo para o aumento do escoamento superficial.

Já nas primeiras observações do registro histórico, em 2012 (Figura 2.A), é possível constatar que o processo de antropização já era muito avançado, com quase a totalidade da mata ciliar suprimida, existindo um remanescente com cerca de 4.237m², que, por sua vez, foi reduzido para apenas 1.366m² até o ano de 2023 (Figura 2.B), ocasionado principalmente pela construção de novas moradias. Também se verificou um acréscimo de 175m de trecho canalizado em seção fechada, passado de 457m para 632m, de 2012 a 2023 (Figura 3). Esse aumento de trechos canalizados e a supressão das matas ciliares são causados majoritariamente por pressão antrópica e é inerente de centros urbanos, e pode ser verificada também em outros cursos d´água no município. O aumento dessas superfícies impermeáveis associado a canalização do curso d'água tende a intensificar o escoamento superficial e reduzir o tempo de concentração da bacia, o que pode resultar em picos de vazão mais elevados durante eventos de chuva intensa, ampliando a suscetibilidade a alagamentos nas áreas a jusante. Além disso, a supressão da mata ciliar implica na perda de serviços ecossistêmicos essenciais, como a retenção de sedimentos, a filtragem de poluentes difusos e a regulação térmica dos corpos hídricos, impactando diretamente a qualidade da água e o equilíbrio ecológico do sistema.



Figura 02: Mapa do afluente estudado com comparação das áreas florestais A em 2012 e B em 2023.
Fonte: O autor (2026).

Quanto à qualidade da vegetação remanescente, nota-se a ausência de uma estrutura florestal consolidada. A predominância de espécimes arbustivas e arbóreas pioneiras denota um alto estágio de degradação ecológica, sugerindo não apenas o comprometimento dos serviços ecossistêmicos, mas também uma redução severa na biodiversidade da fauna e microfauna local. Além disso, o acúmulo de resíduos urbanos observado nas margens do curso d´água (Figura 3) pode também trazer prejuízos à população, por serem hábitat de "pestes urbanas" e espécies de importância médica.



Figura 03: Presença de canalização e antropização do curso d'água objeto do estudo.
Fonte: O autor (2026).

Conforme observado na Figura 4.A, as APP's foram delimitadas com 30 metros de largura, abrangendo tanto o Rio Piedade quanto seus afluentes. Essa metragem segue o Código Florestal para cursos d'água com menos de 10 metros de largura, valendo inclusive para seções canalizadas, tanto em seção aberta, como fechadas, seguindo a jurisprudência do STJ que não abre exceções para o Art. 4° da Lei 12.651/2012 (Brasil, 2025). Em contrapartida, a Figura 4.B ilustra uma das possíveis interpretações da Lei 14.285/2021, com delimitação de uma nova faixa de APP. O cálculo da nova faixa, fundamentado na área ambiental remanescente (1.366m²) e no comprimento do trecho (712,81m), resultou em apenas 1,91m (arredondado para 2m), reflexo da quase inexistência de mata ciliar no local. Entretanto, tendo em vista as recentes recomendações impostas pelos órgãos ambientais, não é possível uma flexibilização para apenas 2m de APP, sendo assim, considerou-se 15m para os trechos em seção aberta, e 5m de área não edificante para os canalizados em seção fechada (Figura 4.B). Em relação às áreas de nascentes, o raio de 50 metros foi mantido, dado que a lei 14.285/2021 não permite sua redução, tais áreas não integram o estudo socioambiental, pois a presença de ocupações nesses perímetros configura impedimento legal absoluto, independentemente da flexibilização legislativa considerada.

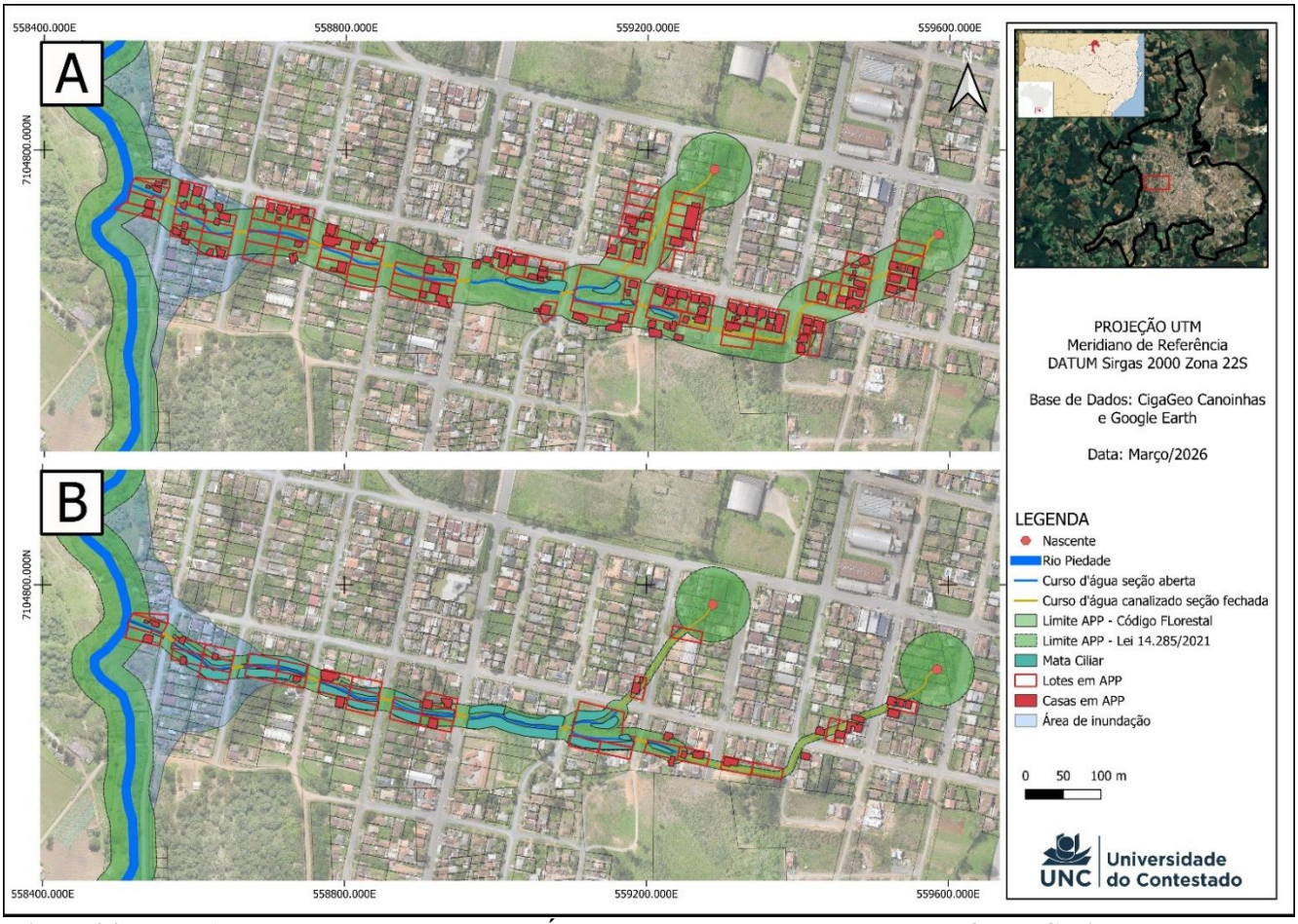


Figura 04: Mapa A mostra a representação das Áreas de Preservação Permanente conforme Código Florestal e B o impacto da flexibilização proposto pela Lei 14.285/2021.
Fonte: O autor (2026).

É possível constatar que após a delimitação hipotética da nova faixa de APP (15m), há uma redução expressiva da área total de APP de aproximadamente 71,9%, passando de 90.702m², para 25.520m² (Tabela 1), porém é importante observar as condições das APP's atuais delimitadas conforme consta no Código Florestal (Figura 3.A) são apenas simbólicas, uma vez que as matas ciliares realmente preservadas correspondem a apenas 1.366m² deste total (1,5%) e se encontram muito degradadas, tendo pouca ou nenhuma função ambiental quando comparada com áreas de floresta nativa. Com a aplicação da Lei 14.285/2021 e consequentemente a flexibilização dos limites de APP, por mais que resulte em uma grande redução dessa faixa legal de preservação, faz com que através do estudo técnico socioambiental, seja realizada a recomposição obrigatória das matas ciliares em toda a extensão dos trechos dos cursos d'água em seção aberta, o que resultaria no aumento considerável da vegetação, adicionando cerca de 9.738m² em área preservada (Figura 3.B), saindo dos 1.366m² atuais para mais de 11.100m², diminuindo assim os impactos causados pela erosão, criando mais ambientes para a fauna local e dando a possibilidade de uma maior recuperação da função ambiental destes fragmentos e do curso d'água. Além das áreas de APP, a lei 14.285/2021 através do estudo técnico socioambiental, será estabelecido áreas não edificantes nas margens dos trechos canalizados, o que acrescentaria uma faixa de 6.085m², que embora não representem obrigatoriamente uma área vegetada, atua como uma faixa de amortecimento,

impedindo também a interferência no local. Quando analisado o impacto econômico e social, podemos verificar que com a aplicação estrita da faixa de 30m, em acordo com o Código Florestal de 2012, 95 lotes e 119 residências e edificações são diretamente impactadas, sendo consideradas dessa forma irregulares. Com a faixa proposta de acordo com a flexibilização (15m de APP), apenas 34 lotes e 28 residências seriam consideradas irregulares, tornando passíveis de regularização 91 edificações, favorecendo dessa forma o adensamento urbano, a valorização imobiliária e a expansão da infraestrutura, pois a aplicação da Lei n°14.285/2021 prioriza a realidade urbana consolidada, reduzindo conflitos entre ocupação e legislação ambiental.

Situação	Código Florestal	Lei 14.285/2021
Nascentes	15.462m²	15.462m²
Área de Preservação Permanente	90.702m²	25.520m²
Área não edificante	0	6.085m²
Mata Ciliar	1.366m²	11.104m²
Lotes	95 (54.853m²)	34 (22.894m²)
Casas	119 (13.038m²)	28 (3.263m²)

Tabela 1: Impactos sociais e ambientais da aplicação da Lei 14.285/2021.
Fonte: O autor (2026).

Além dos impactos ambientais e sociais, foi realizado levantamento dos potenciais impactos econômicos, com foco na construção civil, nesse sentido, foi verificado que a flexibilização da área de preservação permanente permite novas construções em 8 lotes que anteriormente possuíam restrições ambientais. Para uma valoração do potencial de investimento desses imóveis, foi realizado levantamento de 100 alvarás de construção emitidos nos últimos 5 anos no município de Canoinhas, eliminando o de maior e de menor metragem, chegando dessa forma em uma média de 109,61m² de construção por alvará, sendo assim, levando em consideração o custo unitário básico de R$3.037,72/m² conforme SINDUSCON (2026), o custo total para construção nesses novos lotes será de R$2.663.715,91. Esse recurso irá impactar diretamente no recolhimento de impostos e taxas para alvará no município, além da geração de empregos e demanda para o comércio da construção civil, propiciando também a possibilidade de novos financiamentos, fazendo assim a economia local se desenvolver. Além das novas construções, outros 55 lotes possuem construções que atualmente são passíveis de regularização, aumentando a segurança jurídica dos proprietários, além de possibilitar reformas e ampliações.

Considerações finais

Diante dos resultados obtidos, é possível concluir que o processo de ocupação urbana no entorno do curso d'água objeto do estudo ocorreu de forma intensa e desordenada, fez com que o mesmo sofresse alterações significativas ao longo do tempo, evidenciadas pelo aumento do adensamento da população, ampliação das canalizações e supressão das matas ciliares. Ficou demonstrada a fragilidade ambiental atual do curso d'água, devido a pequena fração do remanescente vegetal existente ao longo de sua extensão insuficiente para a manutenção das funções ecossistêmicas da APP, como a estabilização das margens e conservação da biodiversidade. Um dos principais resultados observados, com relação a flexibilização da faixa de APP, com consequente redução da mesma para 15m, embora represente uma diminuição de mais de 70% da área legalmente definida pelo Código Florestal, resultaria na prática em um aumento considerável da vegetação, uma vez que essa restauração seria obrigatória, propiciada pela aplicação da Lei 14.285/2021. Sob a legislação anterior, a proteção de 30m permaneceria apenas no plano teórico, sem aplicabilidade real devido a consolidações urbanas. Em contrapartida, o novo marco legal, ao exigir a recomposição obrigatória das matas ciliares nos trechos abertos como contrapartida à regularização, viabiliza a recuperação de aproximadamente 9.738m² de cobertura vegetal. Portanto, a flexibilização, quando vinculada ao rigor técnico, converte uma área "legalmente protegida, mas degradada" em uma área "legalmente menor, mas efetivamente recuperada". Já sob a perspectiva social e econômica, a flexibilização apresenta resultados importantes, ao reduzir conflitos entre ocupações e a legislação, possibilitando a regularização de edificações consolidadas e ampliando o potencial construtivo em áreas anteriormente restritas, refletindo diretamente na valorização imobiliária, na diversificação da economia local e na geração de empregos, especialmente no setor da construção civil, aumentando inclusive a arrecadação municipal e possibilitando a aplicação posterior desse recurso em infraestrutura para a população local. Assim, conclui-se que a flexibilização das Áreas de Preservação Permanente, quando acompanhada de critérios técnicos e medidas compensatórias adequadas, pode representar uma alternativa viável para o planejamento urbano em áreas consolidadas. Contudo, considera-se de extrema relevância o monitoramento contínuo e de políticas públicas eficazes para garantir a preservação dos recursos hídricos e a regeneração da mata ciliar conforme previsão constante na Lei 14.285/2021, nos pareceres do Ministério Público Estadual, e no estudo técnico socioambiental.

Referências bibliográficas

BRASIL. **Código Florestal. Lei nº 12.651**, de 25 de maio de 2012. Diário Oficial da União, 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 20 abr. 2026

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília: Senado Federal, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 23 abr. 2026

BRASIL. **Superior Tribunal de Justiça. Recurso Especial n° 2105639 – SC (2023/0388704-9).** Brasília, Distrito Federal. Disponível em: https://www.conjur.com.br/wp-content/uploads/2025/07/STJ_202303887049_tipo_integra_321058797.pdf Acesso em: 20 abr. 2026

CASTRO, John Silva. **Mata Ciliar: Importancia e Funcionamento**. Campo Grande. 2017

MESSIAS, Leo Magatti. **Legislação ambiental e áreas de preservação permanente urbanas: uma análise crítica da Lei nº 14.285/21**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Direito) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campus de Três Lagoas, Três Lagoas, 2023.

PANIZZA, Andreia de Castro. **A importância da Mata ciliar: Entenda por que as formações vegetais ciliares são essenciais para os ecossistemas e para os recursos hídricos**. São Paulo. 2016.

SANTA CATARINA. Ministério Público. Centro de Apoio Operacional do Meio Ambiente. **Nota Técnica n° 26/2024**. Florianópolis: MPSC, 2024.

SOUZA, Ana Cristina; PLÍNIO, Dartagnan. **Espaços Territoriais Especialmente Protegidos: Poder Público e Coletividade na Promoção do Meio Ambiente Ecologicamente Equilibrado.** Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 9, n. 5, p. 2215-2248, 2023.

DA CONFORMIDADE NORMATIVA À GOVERNANÇA ORIENTADA POR EVIDÊNCIAS: DESAFIOS DA INSTITUCIONALIZAÇÃO DOS PLANOS DE LOGÍSTICA SUSTENTÁVEL EM INSTITUIÇÕES FEDERAIS DE ENSINO

1 Erich Barboza de Souza, 2 Norma Barbado
1 IFPR Campus Umuarama, e-mail: erich.souza@ifpr.edu.br; 2 IFPR Campus Umuarama, e-mail: norma.barbado@ifpr.edu.br

Palavras-chave: Monitoramento institucional; Efetividade organizacional; Planejamento estratégico.

Resumo

A institucionalização dos Planos de Logística Sustentável (PLS) em instituições federais de ensino constitui um desafio para a gestão pública sustentável, pois a existência formal desses instrumentos nem sempre resulta em práticas efetivas, monitoradas e integradas ao planejamento institucional. Este artigo analisa os limites e as potencialidades da institucionalização dos PLS em instituições federais de ensino, com ênfase na transição entre conformidade normativa e governança orientada por evidências. A pesquisa apresenta abordagem qualitativa e caráter analítico-integrador, articulando resultados de revisão sistematizada da literatura e de estudo de caso documental realizado em uma instituição federal de ensino. A análise foi orientada por categorias relacionadas à aderência normativa, implementação das ações, definição de metas, uso de indicadores, monitoramento e integração ao planejamento institucional. Os resultados indicam que os PLS apresentam avanços quanto à formalização e à presença de eixos temáticos estruturantes, especialmente água, energia, resíduos e qualidade de vida no trabalho. Entretanto, persistem fragilidades na definição de metas mensuráveis, na consolidação de linhas de base, no acompanhamento sistemático das ações e na articulação com instrumentos estratégicos, como o Plano de Desenvolvimento Institucional. Conclui-se que a efetividade dos PLS depende da superação de uma lógica meramente normativa, exigindo sistemas de monitoramento, indicadores auditáveis, responsabilização institucional e integração entre gestão, planejamento e cultura organizacional.

Introdução

A incorporação da sustentabilidade à gestão pública tem se consolidado como uma exigência normativa e institucional nas últimas décadas, especialmente no contexto das instituições federais de ensino, que passaram a adotar instrumentos formais voltados à racionalização do uso de recursos naturais, à redução de impactos ambientais e à promoção de práticas organizacionais mais eficientes. Nesse cenário, os Planos de Logística Sustentável (PLS) emergem como dispositivos estratégicos de gestão, estruturados a partir de diretrizes que articulam dimensões ambientais, administrativas e institucionais, com o objetivo de orientar ações relacionadas ao consumo de água e energia, gestão de resíduos, qualidade de vida no trabalho, compras sustentáveis e capacitação (Brasil, 2012a; Brasil, 2012b).

No entanto, embora haja avanços significativos na adesão formal aos PLS, a literatura tem evidenciado que sua efetividade ainda é limitada, especialmente no que se refere à capacidade de converter diretrizes normativas em práticas organizacionais estruturadas e mensuráveis. Estudos apontam que a institucionalização da sustentabilidade em organizações públicas frequentemente apresenta um descompasso entre a formalização de instrumentos e sua incorporação às rotinas administrativas, evidenciando fragilidades na definição de metas, na consolidação de indicadores e na implementação de sistemas de monitoramento e avaliação (Lozano, 2006; Lozano et al., 2015; Ávila et al., 2017).

No campo específico da gestão de recursos, observa-se que as ações associadas aos PLS tendem a concentrar-se em medidas de natureza técnico-administrativa, com maior incidência em eixos como consumo de água e energia, enquanto estratégias voltadas à mudança comportamental e à transformação organizacional apresentam menor grau de desenvolvimento (Tauchen; Brandli, 2006). Na gestão de resíduos, por sua vez, persistem limitações relacionadas à rastreabilidade dos fluxos materiais e à implementação de práticas de logística reversa, o que compromete a avaliação da efetividade das políticas institucionais (Hecktheuer, 2012). De forma semelhante, no eixo de qualidade de vida no trabalho, predominam abordagens centradas em saúde e segurança ocupacional, com menor incorporação de dimensões psicossociais e institucionais mais amplas (Limongi-França, 2004).

Além dessas fragilidades operacionais, destaca-se a dificuldade de integração dos PLS aos instrumentos de planejamento estratégico, como os Planos de Desenvolvimento Institucional (PDI), o que limita a consolidação da sustentabilidade como elemento estruturante da gestão institucional. Evidências indicam que, em muitos casos, a sustentabilidade é incorporada de forma predominantemente discursiva, sem a definição clara de metas, indicadores e mecanismos de avaliação que permitam sua efetiva operacionalização (Ávila et al., 2017; Marques; Santos; Aragão, 2020). Essa condição reforça a existência de um processo de institucionalização incompleto, caracterizado pela coexistência entre conformidade normativa e fragilidade operacional.

Nesse contexto, a análise da institucionalização dos PLS demanda uma abordagem que ultrapasse a verificação de sua existência formal, incorporando a avaliação de sua capacidade de produzir resultados concretos e sustentados ao longo do tempo.

Tal perspectiva dialoga com abordagens da teoria institucional que destacam o fenômeno do decoupling, entendido como a dissociação entre estruturas formais e práticas organizacionais efetivas, especialmente em contextos marcados por forte pressão normativa (Meyer; Rowan, 1977; Bromley; Powell, 2012).

Diante desse cenário, o presente artigo tem como objetivo analisar os desafios da institucionalização dos Planos de Logística Sustentável em instituições federais de ensino, com ênfase na transição entre conformidade normativa e governança orientada por evidências. Para tanto, adota-se uma abordagem analítico-integrada, articulando evidências provenientes de revisão sistematizada da literatura com resultados de análise documental em nível organizacional, buscando identificar padrões, limitações e oportunidades para o aprimoramento da gestão da sustentabilidade no setor público.

A relevância do estudo reside na possibilidade de contribuir para o avanço do debate sobre governança da sustentabilidade em instituições públicas, ao evidenciar a necessidade de integração entre planejamento, monitoramento e avaliação, bem como de fortalecimento de indicadores e sistemas de acompanhamento capazes de sustentar processos decisórios baseados em evidências. Ao propor uma leitura integrada entre diferentes níveis de análise, o artigo busca oferecer subsídios para a superação de uma lógica predominantemente normativa, avançando em direção à consolidação de práticas institucionais mais efetivas, mensuráveis e alinhadas aos princípios da gestão pública sustentável.

Material e Métodos

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem qualitativa e natureza analítico-integrativa, orientada à compreensão dos processos de institucionalização dos PLS em instituições federais de ensino. A estratégia metodológica adotada combinou duas frentes complementares de análise: (i) revisão sistematizada da literatura científica e (ii) análise documental em nível organizacional, configurando um desenho que articula evidências em escala macro e micro, com vistas à construção de uma interpretação integrada do fenômeno investigado.

A revisão sistematizada da literatura teve como objetivo identificar padrões, tendências e lacunas na produção científica relacionada à implementação dos PLS no contexto das instituições federais de ensino superior. As buscas foram realizadas em bases de dados nacionais amplamente utilizadas nas áreas de Ciências Ambientais e Sociais Aplicadas, incluindo o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a *Scientific Electronic Library Online* (SciELO) e o Google Scholar. Foram utilizados descritores em língua portuguesa, combinados por operadores booleanos, tais como “Plano de Logística Sustentável”, “PLS”, “instituições de ensino superior”, “sustentabilidade” e “gestão ambiental”. O recorte temporal contemplou publicações posteriores à regulamentação dos PLS na administração pública federal, com aplicação de critérios de inclusão relacionados à aderência temática, disponibilidade de texto completo e rigor metodológico, e critérios de exclusão que eliminaram documentos duplicados, estudos sem aplicação institucional direta e produções acadêmicas não submetidas à avaliação por pares.

Paralelamente, foi realizada análise documental com foco em uma instituição federal de ensino, considerada como unidade de análise organizacional. Foram examinados documentos institucionais oficiais, incluindo o PLS, instrumentos de planejamento estratégico, relatórios administrativos e registros operacionais disponíveis em meios institucionais. Esse procedimento permitiu avaliar a estrutura do plano, seus eixos temáticos, a definição de metas e indicadores, bem como a existência de mecanismos de monitoramento, avaliação e integração ao planejamento institucional. A análise documental é reconhecida como estratégia adequada para investigações qualitativas voltadas à compreensão de políticas públicas e instrumentos de gestão, ao possibilitar o acesso a registros formais que expressam diretrizes, práticas e rotinas organizacionais (Cellard, 2008).

A análise dos dados foi conduzida por meio da técnica de análise de conteúdo, conforme proposta por Bardin (2011), estruturada em três etapas: pré-análise, exploração do material e tratamento dos resultados, com inferência e interpretação. As categorias analíticas foram definidas a priori, com base na literatura sobre institucionalização da sustentabilidade, contemplando aspectos como aderência normativa, conformidade estrutural, implementação das ações, definição de metas, uso de indicadores, mecanismos de monitoramento e integração ao planejamento institucional. Ao longo do processo analítico, as categorias foram refinadas de modo a garantir maior aderência às evidências empíricas.

Para assegurar maior robustez metodológica, adotou-se a triangulação de dados e de referenciais analíticos, combinando diferentes fontes de informação e perspectivas interpretativas. Essa estratégia contribuiu para ampliar a consistência das inferências, reduzir vieses associados à análise de uma única fonte e fortalecer a validade analítica dos resultados (Yin, 2015; Flick, 2009). A generalização dos achados é de natureza analítica, e não estatística, sendo orientada pela capacidade de dialogar com referenciais teóricos e contextos institucionais semelhantes.

Como limitação, destaca-se a dependência de dados documentais, o que pode restringir a análise às informações formalmente registradas, não contemplando integralmente práticas informais ou dinâmicas organizacionais não documentadas. Ainda assim, a estratégia metodológica adotada permite identificar padrões relevantes de institucionalização e oferecer subsídios consistentes para a interpretação dos desafios associados à governança da sustentabilidade em instituições públicas de ensino.

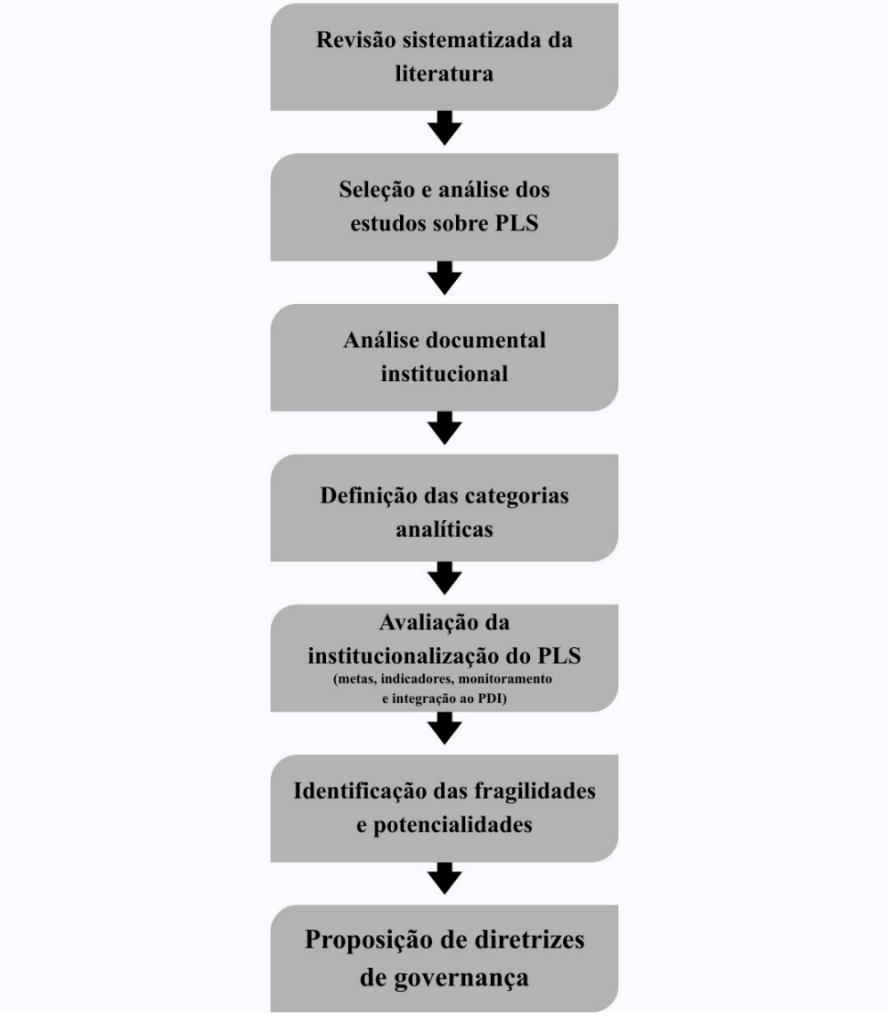
Com o objetivo de aprofundar a análise e conferir maior rigor ao processo interpretativo, foi estruturado um modelo analítico de institucionalização dos PLS, organizado em etapas sequenciais de avaliação. Esse modelo permitiu sistematizar a leitura dos documentos e da literatura, garantindo maior consistência na identificação de padrões e lacunas, além de possibilitar a integração entre diferentes níveis de análise.

A operacionalização da análise ocorreu em quatro etapas principais, envolvendo a identificação dos elementos estruturais dos PLS com base nos eixos normativos estabelecidos, a verificação da presença de metas, indicadores e mecanismos de monitoramento, a análise da integração do plano com instrumentos de planejamento institucional, especialmente o Plano de

Desenvolvimento Institucional, e a interpretação das evidências à luz do referencial teórico da institucionalização da sustentabilidade. Essa abordagem permitiu não apenas descrever os instrumentos analisados, mas também avaliar seu grau de maturidade institucional, considerando a capacidade de conversão de diretrizes formais em práticas organizacionais efetivas.

A Figura 1 apresenta o fluxograma metodológico da pesquisa, sintetizando as etapas do percurso analítico adotado e evidenciando a articulação entre revisão de literatura, análise documental e interpretação dos dados.

Figura 1: Fluxograma metodológico da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A sistematização apresentada na Figura 1 evidencia que o estudo adotou uma abordagem analítico-integrativa, na qual a interpretação dos dados se fundamenta na articulação entre evidências empíricas e referenciais teóricos, permitindo compreender não apenas a estrutura dos PLS, mas também os fatores que condicionam sua efetividade no contexto institucional analisado.

Resultados e Discussão

A análise integrada dos dados evidencia que a institucionalização dos PLS em instituições federais de ensino ocorre de forma heterogênea, combinando avanços na conformidade normativa com limitações persistentes na sua efetividade organizacional. De modo geral, observa-se que os instrumentos analisados apresentam elevada aderência formal às diretrizes estabelecidas no arcabouço normativo da administração pública federal, com a presença dos principais eixos temáticos, como consumo de água e energia, gestão de resíduos e qualidade de vida no trabalho. Esse resultado confirma tendências já identificadas na literatura, que apontam a consolidação dos PLS como instrumentos amplamente difundidos no plano documental (Ávila et al., 2017; Lozano et al., 2015).

Todavia, essa conformidade normativa não se traduz, necessariamente, em práticas institucionais estruturadas, mensuráveis e sustentadas ao longo do tempo. A análise da produção científica e dos documentos institucionais revela que a institucionalização dos PLS ocorre, em muitos casos, de forma parcial, marcada pela coexistência entre formalização e fragilidade operacional. Esse padrão indica que a presença de estruturas formais não garante sua internalização nos processos organizacionais, evidenciando limitações na capacidade de transformação institucional e na consolidação de uma governança efetivamente orientada por resultados.

Uma das principais fragilidades identificadas refere-se à ausência de metas claramente definidas e operacionalizadas por meio de indicadores consistentes. Em muitos casos, os planos apresentam diretrizes genéricas, sem a definição de linhas de base, responsáveis institucionais e prazos de execução, o que compromete sua operacionalização e dificulta a avaliação de resultados. Essa lacuna impede a construção de sistemas de monitoramento contínuo e reduz a capacidade institucional de aprendizagem baseada em evidências, limitando o aprimoramento dos processos de gestão.

Além disso, a ausência de indicadores estruturados compromete a transparência e a accountability institucional. A inexistência de métricas confiáveis limita a capacidade de avaliar o desempenho das ações implementadas e dificulta a tomada de decisão estratégica. Nesse sentido, a construção de indicadores ambientais e organizacionais emerge como elemento central para a consolidação de uma governança da sustentabilidade orientada por evidências, permitindo não apenas o acompanhamento das ações, mas também a reorientação das estratégias institucionais ao longo do tempo.

No que se refere à implementação das ações, observa-se a predominância de iniciativas de natureza técnico-administrativa, especialmente nos eixos relacionados ao consumo de recursos naturais. Medidas como redução do consumo de energia e água, substituição de equipamentos e racionalização de insumos são recorrentes e, em geral, mais facilmente implementadas, por demandarem menor complexidade organizacional. Em contrapartida, ações voltadas à sensibilização, à educação institucional e à transformação da cultura organizacional apresentam menor incidência e menor grau de consolidação, o que limita o alcance das políticas de sustentabilidade.

Esse padrão revela um desequilíbrio na implementação dos PLS, no qual dimensões operacionais são priorizadas em detrimento de aspectos culturais e institucionais. Tal configuração reforça a compreensão de que a sustentabilidade institucional não se limita à adoção de soluções técnicas, mas depende da internalização de valores, práticas e comportamentos no cotidiano organizacional, exigindo estratégias que articulem gestão, educação e participação institucional.

A gestão de resíduos configura-se como um dos eixos mais críticos no processo de institucionalização dos PLS. Embora sejam observadas iniciativas relacionadas à coleta seletiva e à destinação adequada, persistem lacunas significativas quanto à rastreabilidade dos fluxos materiais e à implementação de sistemas de logística reversa. A ausência de registros sistemáticos e de mecanismos de controle compromete a capacidade de monitorar os resultados e de comprovar a destinação final dos resíduos, fragilizando a governança ambiental institucional e evidenciando a necessidade de integração entre gestão de resíduos, sistemas de informação e mecanismos de controle.

No eixo de qualidade de vida no trabalho, os resultados indicam a predominância de ações voltadas à saúde e segurança ocupacional, com menor atenção a dimensões psicossociais, organizacionais e institucionais mais amplas. Esse padrão sugere uma abordagem ainda restrita da sustentabilidade, centrada em aspectos normativos e operacionais, sem avançar para uma compreensão integrada do bem-estar no ambiente de trabalho. A ampliação desse eixo requer a incorporação de estratégias relacionadas ao clima organizacional, ao engajamento dos servidores e à construção de ambientes institucionais mais participativos e colaborativos.

A análise em nível organizacional reforça esses achados ao evidenciar elevada conformidade estrutural do PLS, porém com limitações na sua operacionalização. Observou-se ausência de metas mensuráveis, fragilidade nos sistemas de monitoramento e baixa integração com o planejamento institucional, especialmente com o Plano de Desenvolvimento Institucional (PDI), o que reduz o potencial do PLS como instrumento estratégico de gestão e limita sua contribuição para a consolidação da sustentabilidade institucional.

Essa dissociação entre estrutura formal e prática organizacional pode ser interpretada à luz do conceito de *decoupling* (Meyer; Rowan, 1977; Bromley; Powell, 2012), caracterizado pela separação entre políticas institucionalizadas e sua efetiva implementação. No contexto analisado, os PLS tendem a cumprir uma função de legitimação institucional, atendendo às exigências normativas, sem que isso implique, necessariamente, a consolidação de práticas efetivas, monitoradas e orientadas por resultados.

A síntese das principais fragilidades identificadas no processo de institucionalização pode ser observada no Quadro 1, que sistematiza os principais desafios estruturais e suas implicações para a gestão institucional.

Quadro 1: Principais desafios na institucionalização dos Planos de Logística Sustentável.

Dimensão	Principais fragilidades	Implicações
Planejamento	Ausência de metas e linhas de base	Dificuldade de avaliação
Monitoramento	Falta de indicadores estruturados	Baixa capacidade de controle
Implementação	Predomínio técnico-administrativo	Baixa mudança organizacional
Gestão de resíduos	Falta de rastreabilidade	Fragilidade ambiental
Integração institucional	Baixa articulação com PDI	Redução do caráter estratégico

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Diante dessas fragilidades, torna-se necessário avançar na proposição de diretrizes que contribuam para o fortalecimento da governança da sustentabilidade no contexto das instituições públicas de ensino. Nesse sentido, a transição de um modelo baseado na conformidade normativa para um modelo orientado por evidências requer a integração entre planejamento, execução e monitoramento, bem como a adoção de instrumentos que permitam avaliar o desempenho institucional de forma contínua e sistemática.

Complementarmente, o Quadro 2 apresenta diretrizes propostas para o fortalecimento da governança dos PLS, estruturadas a partir das fragilidades identificadas, indicando caminhos para a superação de uma institucionalização meramente formal e para a consolidação de práticas organizacionais mais efetivas.

Quadro 2: Diretrizes para fortalecimento da governança dos Planos de Logística Sustentável

Dimensão	Diretrizes propostas	Resultados esperados
Planejamento	Definição de metas mensuráveis e linhas de base	Clareza e direcionamento estratégico
Monitoramento	Implementação de indicadores auditáveis	Acompanhamento contínuo
Gestão institucional	Integração com o PDI	Fortalecimento da sustentabilidade institucional
Cultura organizacional	Ações de sensibilização e capacitação	Engajamento institucional
Avaliação	Criação de rotinas periódicas de avaliação	Aprendizagem organizacional

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A partir dessa análise, observa-se que a efetividade dos PLS está diretamente associada à capacidade institucional de integrar diferentes dimensões da gestão, incluindo planejamento estratégico, monitoramento de indicadores, avaliação contínua e engajamento organizacional. Esse processo exige não apenas ajustes técnicos, mas também transformações institucionais mais amplas, capazes de promover a internalização da sustentabilidade como princípio orientador da gestão.

Além disso, a consolidação da sustentabilidade institucional depende da incorporação de estratégias voltadas à mudança comportamental e à aprendizagem organizacional. A transformação das práticas institucionais requer o envolvimento ativo dos atores organizacionais, a capacitação contínua e a construção de uma cultura institucional comprometida com a sustentabilidade.

A partir dessa análise, observa-se que a institucionalização dos PLS não deve ser compreendida como um processo linear, mas como um movimento dinâmico e contínuo, no qual avanços e limitações coexistem em diferentes dimensões da gestão. Essa condição evidencia a necessidade de abordagens sistêmicas que considerem a interdependência entre planejamento, execução, monitoramento e aprendizagem institucional, permitindo maior consistência na implementação das políticas de sustentabilidade.

Em síntese, os resultados indicam que os PLS se encontram em um estágio intermediário de institucionalização, caracterizado pela presença de estruturas formais, porém com limitações na sua efetiva operacionalização. A superação desse estágio depende da adoção de modelos de gestão baseados em evidências, capazes de transformar diretrizes normativas em resultados concretos, fortalecendo a governança da sustentabilidade no âmbito das instituições públicas de ensino.

Considerações Finais

O presente estudo teve como objetivo analisar os desafios da institucionalização dos PLS em instituições federais de ensino, com ênfase na transição entre conformidade normativa e governança orientada por evidências. A partir da articulação entre revisão da literatura e análise em nível organizacional, foi possível evidenciar que, embora os PLS estejam consolidados como instrumentos formais de gestão, sua efetividade ainda é limitada pela fragilidade na operacionalização, no monitoramento e na integração ao planejamento institucional.

Os resultados confirmam que a adesão normativa, por si só, não assegura a incorporação da sustentabilidade às rotinas organizacionais. Observou-se um padrão recorrente caracterizado pela presença de estruturas formais adequadas, porém com lacunas na definição de metas mensuráveis, ausência de indicadores consistentes e limitações nos sistemas de acompanhamento e avaliação. Esse descompasso evidencia a necessidade de superar uma abordagem centrada na conformidade documental, avançando para práticas orientadas por resultados e sustentadas por evidências.

Nesse sentido, destaca-se que a efetividade dos PLS depende de um conjunto de condições institucionais, entre as quais se sobressaem a consolidação de inventários e linhas de base, a definição de metas claras com responsáveis e prazos, a implementação de sistemas contínuos de monitoramento e a integração efetiva com os instrumentos de planejamento estratégico. Tais elementos configuram as bases para o fortalecimento da governança da sustentabilidade, permitindo maior transparência, controle e capacidade de tomada de decisão.

Além disso, o estudo reforça a importância de incorporar dimensões organizacionais e comportamentais às estratégias de sustentabilidade, reconhecendo que mudanças estruturais dependem do engajamento dos atores institucionais e da construção de uma cultura organizacional alinhada a esses princípios. A integração entre gestão, planejamento e processos educativos emerge, portanto, como elemento central para a consolidação de práticas mais efetivas.

Do ponto de vista teórico, o artigo contribui ao evidenciar a persistência do descompasso entre normatividade e prática, indicando a necessidade de abordagens analíticas que considerem a institucionalização como um processo dinâmico e condicionado por fatores estruturais e organizacionais. No campo aplicado, os resultados oferecem subsídios para o aprimoramento da gestão pública sustentável, especialmente no que se refere ao desenvolvimento de indicadores, ao fortalecimento de sistemas de monitoramento e à integração dos PLS ao planejamento institucional.

Por fim, recomenda-se que futuras pesquisas avancem na investigação empírica em diferentes contextos institucionais, bem como na construção de modelos e instrumentos que auxiliem a implementação de PLS orientados por desempenho. A consolidação de uma governança da sustentabilidade baseada em evidências representa um caminho promissor para a

transformação das diretrizes formais em resultados concretos, contribuindo para o fortalecimento das políticas públicas no âmbito das instituições de ensino.

Referências Bibliográficas

ÁVILA, L. V.; LEAL FILHO, W.; BRANDLI, L. L.; MACGREGOR, C. J.; MOLTHAN-HILL, P.; ÖZUYAR, P. G.; MOREIRA, R. M. Barriers to innovation and sustainability at universities around the world. *Journal of Cleaner Production*, v. 164, p. 1268–1278, 2017.

BARDIN, L. *Análise de conteúdo*. São Paulo: Edições 70, 2011.

BRASIL. Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993. Regulamenta o art. 37, inciso XXI, da Constituição Federal, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 22 jun. 1993.

BRASIL. Lei nº 12.349, de 15 de dezembro de 2010. Altera a Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993, para incluir critérios de desenvolvimento sustentável nas contratações públicas. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 16 dez. 2010.

BRASIL. Decreto nº 7.746, de 5 de junho de 2012. Regulamenta o art. 3º da Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993, para estabelecer critérios, práticas e diretrizes para a promoção do desenvolvimento nacional sustentável nas contratações públicas. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 6 jun. 2012a.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instrução Normativa nº 10, de 12 de novembro de 2012. Estabelece regras para elaboração dos Planos de Logística Sustentável na Administração Pública Federal. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 14 nov. 2012b.

BROMLEY, P.; POWELL, W. W. From smoke and mirrors to walking the talk: Decoupling in the contemporary world. *Academy of Management Annals*, v. 6, n. 1, p. 483–530, 2012.

CELLARD, A. A análise documental. In: POUPART, J. et al. (org.). *A pesquisa qualitativa: enfoques epistemológicos e metodológicos*. Petrópolis: Vozes, 2008. p. 295–316.

FLICK, U. *Introdução à pesquisa qualitativa*. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

HECKTHEUER, L. H. R. Gestão de resíduos sólidos em instituições de ensino superior: estudo de caso em uma universidade pública. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

LIMONGI-FRANÇA, A. C. *Qualidade de vida no trabalho: conceitos e práticas nas empresas da sociedade pós-industrial*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2004.

LOZANO, R. Incorporating and institutionalizing sustainability in universities: breaking through barriers to change. *Journal of Cleaner Production*, v. 14, n. 9-11, p. 787–796, 2006.

LOZANO, R.; CEULEMANS, K.; SEATON, M.; HUISINGH, D.; LOZANO, F. J.; WASSENHOVE, L.; LAMBERT, J. A review of commitment and implementation of sustainable development in higher education: results from a worldwide survey. *Journal of Cleaner Production*, v. 108, p. 1–18, 2015.

MARQUES, L. F.; SANTOS, V. R.; ARAGÃO, R. F. Sustentabilidade no planejamento estratégico de instituições públicas de ensino superior. *Revista de Administração Pública*, v. 54, n. 2, p. 389–408, 2020.

MEYER, J. W.; ROWAN, B. Institutionalized organizations: formal structure as myth and ceremony. *American Journal of Sociology*, v. 83, n. 2, p. 340–363, 1977.

TAUCHEN, J.; BRANDLI, L. L. A gestão ambiental em instituições de ensino superior: modelo para implantação em campus universitário. *Gestão & Produção*, v. 13, n. 3, p. 503–515, 2006.

YIN, R. K. *Estudo de caso: planejamento e métodos*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

DETECÇÃO MULTITEMPORAL DE INFESTAÇÃO POR MACRÓFITAS EM RESERVATÓRIO HIDRELÉTRICO COM IMAGENS SENTINEL-2 E NDVI

1Mauricio Rodrigo Schmitt, 2Luiz Carlos Weinschütz, 3Jairo Marchesan, 4 Leandro Silva Nizer, 5 Luana Cechin

1 Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Civil, Sanitária e Ambiental, Universidade do Contestado, e-mail: mauricio.schmitt@unc.br, 2 Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Civil, Sanitária e Ambiental, Universidade do Contestado, e-mail: luizw@unc.br, 3 Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Civil, Sanitária e Ambiental, Universidade do Contestado, e-mail: jairo@unc.br, 4 Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Civil, Sanitária e Ambiental (PMPECSA), Universidade do Contestado, Mafra-SC, e-mail: leandronizer@gmail.com, 5 Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Civil, Sanitária e Ambiental, Universidade do Contestado, e-mail: luana.cechin@professor.unc.br

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; eutrofização; macrófitas aquáticas.

Resumo

A eutrofização de reservatórios artificiais representa um dos principais desafios para a gestão ambiental de corpos hídricos sujeitos ao aporte contínuo de nutrientes de origem antrópica. Em ambientes lênticos, o excesso de nitrogênio e fósforo favorece a proliferação de macrófitas aquáticas, comprometendo a qualidade da água, a biodiversidade e o funcionamento operacional de sistemas hidrelétricos. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo monitorar multitemporalmente a infestação por vegetação aquática na Represa São Lourenço, localizada no município de Mafra, Santa Catarina, por meio de imagens orbitais Sentinel-2 e do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Foi estabelecida uma série histórica entre setembro de 2022 e abril de 2026, combinando análise plurianual da condição basal e monitoramento intensificado durante o evento de eutrofização registrado entre 2025 e 2026. O processamento foi realizado no ambiente "*Copernicus Browser*", com cálculo do NDVI a partir das bandas B04 e B08, extração de estatísticas zonais e análise temporal complementar das bandas do vermelho, red edge e infravermelho próximo em ambiente R. Os resultados evidenciaram transição espectral inequívoca entre a condição de espelho d'água livre observada até 2024 e a fase crítica de saturação por biomassa vegetal no segundo semestre de 2025. A mediana do NDVI elevou-se de -0,1149, em setembro de 2024, para 0,8008 no início de outubro de 2025, enquanto as bandas do infravermelho próximo apresentaram incremento superior a quatro vezes em relação à condição basal. Após as ações de manejo executadas pelas Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC) no final de 2025, verificou-se redução expressiva dos índices em abril de 2026, indicando recuperação parcial do reservatório. Conclui-se que a integração entre sensoriamento remoto orbital, análise estatística e validação visual constitui ferramenta eficiente, de baixo custo e alta replicabilidade para diagnóstico, acompanhamento e suporte à gestão ambiental de reservatórios sujeitos à eutrofização.

Introdução

Reservatórios artificiais inseridos em bacias hidrográficas com uso intensivo do solo e produção agropecuária estão entre os ambientes aquáticos mais suscetíveis a processos de eutrofização. O aporte contínuo de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo oriundos de efluentes domésticos, atividades agroindustriais e carreamento superficial, favorece o crescimento acelerado de organismos fotossintetizantes, incluindo algas e macrófitas aquáticas flutuantes (Cary; Weerts, 1983; Thomaz; Bini, 1998). Esse enriquecimento trófico compromete a qualidade da água, reduz a oxigenação, altera a dinâmica ecológica do sistema e interfere diretamente em usos múltiplos, dentre outros, consumo humano, dessedentação animal, recreação e geração de energia. Entre as espécies frequentemente associadas a ambientes eutrofizados destaca-se *Salvinia molesta*, pteridófita aquática de rápido crescimento vegetativo, reconhecida pelo elevado potencial de colonização superficial e pela formação de densos tapetes de biomassa (Cary; Weerts, 1983). Em reservatórios com baixa circulação hidráulica, sua proliferação pode ocorrer em escala exponencial quando associada à alta disponibilidade de nutrientes dissolvidos, transformando rapidamente extensas áreas de espelho d'água em superfícies vegetadas. O monitoramento convencional de macrófitas aquáticas, baseado exclusivamente em vistorias de campo, apresenta limitações operacionais relacionadas ao custo, à periodicidade amostral e à dificuldade de obtenção de dados quantitativos contínuos. Nesse cenário, o sensoriamento remoto orbital tem se consolidado como importante ferramenta de apoio à gestão ambiental, permitindo acompanhar alterações biofísicas da superfície aquática em diferentes escalas temporais e espaciais (Rowan; Kalacska, 2021; Malthus, 2017). Dentre os sensores disponíveis gratuitamente, o satélite Sentinel-2 destaca-se pela resolução espacial de 10 a 20 metros, elevada frequência de revisita e disponibilidade de bandas espectrais sensíveis à atividade fotossintética (Drusch *et al.,* 2012).

A utilização do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) em ambientes aquáticos eutrofizados tem demonstrado elevada eficiência na distinção entre superfícies de água livre e áreas ocupadas por biomassa vegetal flutuante, uma vez que a vegetação apresenta baixa reflectância na região do vermelho e alta resposta espectral no infravermelho próximo (Rouse *et al.,* 1973). Dessa forma, a análise multitemporal do NDVI permite não apenas detectar a presença de macrófitas, mas também quantificar a intensidade e a evolução espacial da infestação.

A Represa São Lourenço, localizada no município de Mafra (Figura 1), constitui um exemplo representativo desse processo. Ao longo de 2025, o reservatório apresentou rápida expansão de cobertura por vegetação aquática flutuante, associada a episódios de lançamento irregular de efluentes e ao agravamento das condições de enriquecimento nutricional do sistema. Tal cenário evidenciou a necessidade de ferramentas capazes de mensurar com precisão a magnitude da infestação e subsidiar tecnicamente ações de fiscalização e manejo. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo realizar o monitoramento multitemporal da infestação por macrófitas aquáticas na Represa São Lourenço, por meio da integração entre imagens orbitais Sentinel-2, cálculo do NDVI e análise temporal da assinatura espectral da biomassa fotossintética no período de 2020 a 2026.

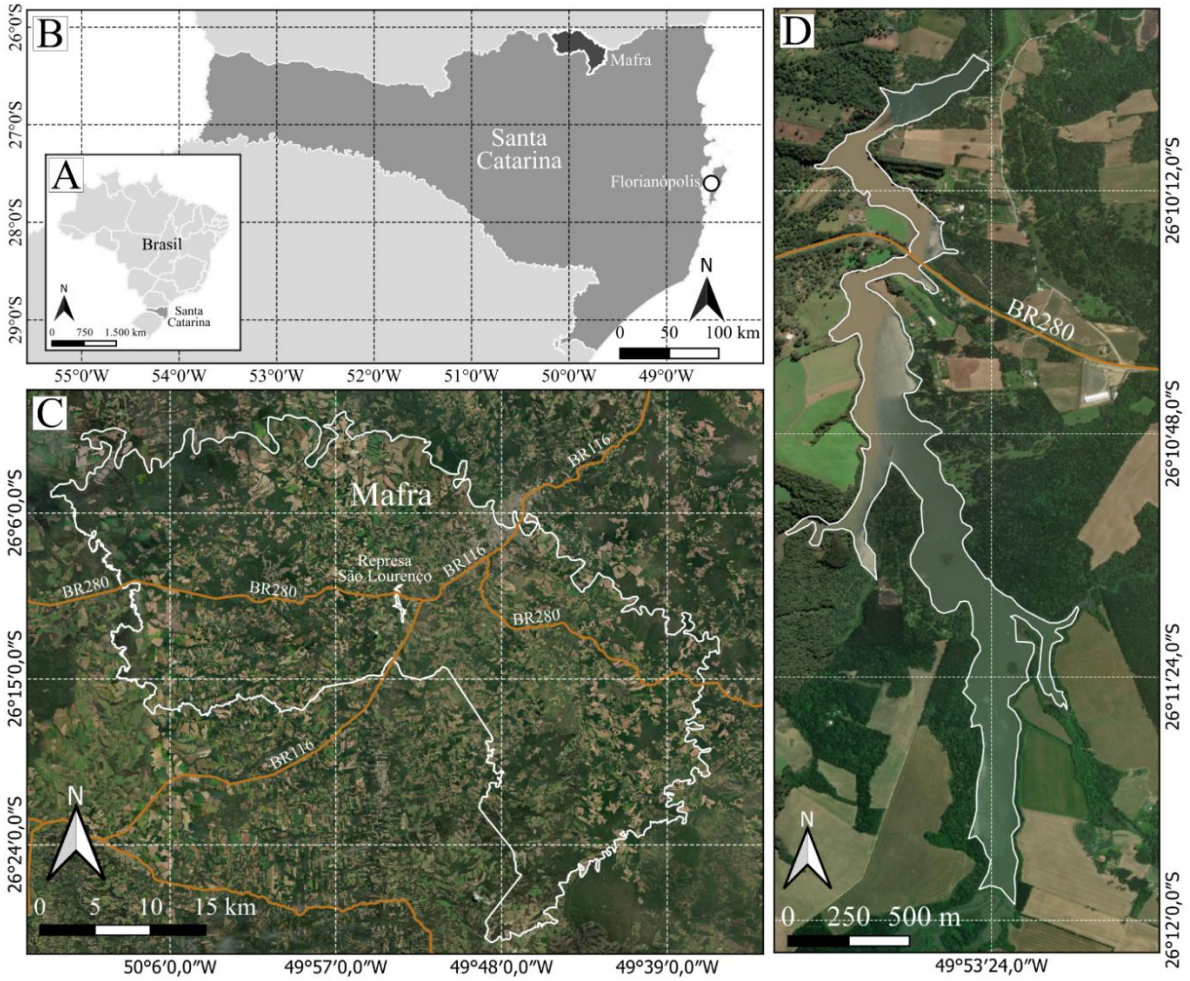


Figura 1. Contextualização espacial da área de estudo e delimitação do reservatório monitorado. (A) Inserção do estado de Santa Catarina no território brasileiro; (B) localização do município de Mafra no norte catarinense; (C) enquadramento regional da Represa São Lourenço no município de Mafra; e (D) detalhe da área inundada empregada como máscara vetorial para o processamento das imagens Sentinel-2 e análises multitemporais de NDVI.

Material e Métodos

A Represa São Lourenço está localizada no município de Mafra, Sul do Brasil (Figura 1), sob gerência da Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC), integrando o sistema operacional da Usina São Lourenço (26°09'42"S; 49°53'24"W). O reservatório possui área inundada aproximada de 796.804 m² e caracteriza-se como ambiente lêntico de baixa renovação hídrica, condição que favorece a deposição de sedimentos finos, o acúmulo de matéria orgânica e a retenção de nutrientes dissolvidos. Inserido em bacia hidrográfica com forte influência agropecuária, silvicultural e urbana, o sistema recebe aporte difuso e pontual de poluentes provenientes de áreas agrícolas, atividades industriais e lançamento de efluentes sanitários, configurando cenário propício ao desencadeamento de processos de eutrofização e proliferação de macrófitas aquáticas.

Foi estruturada uma série histórica de monitoramento compreendendo o intervalo de janeiro de 2022 a abril de 2026, utilizando imagens multiespectrais do satélite Sentinel-2, produto Level-2A, disponibilizadas pelo programa Copernicus da Agência Espacial Europeia (ESA, 2016–2026; Drusch *et al.,* 2012). Foram selecionadas exclusivamente cenas com baixa interferência de nuvens sobre a área de interesse (<10%) e com qualidade radiométrica satisfatória. A amostragem temporal foi dividida em duas escalas analíticas complementares: (i) escala plurianual, com seleção de imagens anuais representativas entre 2020 e 2024 para estabelecimento da condição de referência ambiental do reservatório; e (ii) escala de evento, com monitoramento mensal e quinzenal entre fevereiro de 2025 e abril de 2026, período correspondente ao desenvolvimento, pico e manejo da infestação por vegetação

aquática. O processamento das imagens foi conduzido na plataforma Copernicus Browser e os dados brutos de NDVI de toda a série temporal do Sentinel 2, exportados em arquivo csv para análise estatística. A delimitação espacial do reservatório foi realizada por meio de arquivo vetorial do tipo shapefile, utilizado como máscara para recorte e padronização das análises.

Para detecção da biomassa fotossinteticamente ativa foi empregado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), calculado a partir das bandas B04 (vermelho; 665 nm) e B08 (infravermelho próximo; 842 nm), segundo a expressão:

$$NDVI = \frac{(B8 - B4)}{(B8 + B4)}$$

A escolha do NDVI fundamenta-se em sua ampla aplicabilidade na distinção entre superfícies de água livre e cobertura vegetal, uma vez que organismos fotossintetizantes apresentam absorção da radiação no vermelho e elevada reflectância no infravermelho próximo. Valores negativos ou próximos de zero foram interpretados como predominância de espelho d'água, enquanto valores superiores a 0,4 foram considerados indicativos de ocupação expressiva por macrófitas flutuantes, conforme validação visual das cenas orbitais. Após o cálculo do índice, foram extraídas estatísticas zonais para cada data analisada, incluindo valores mínimo, máximo, média, desvio padrão, mediana e percentis 10 e 90, permitindo avaliar a distribuição espacial da biomassa dentro do reservatório e reduzir o efeito de pixels extremos.

Com o objetivo de complementar a interpretação do NDVI, foram extraídos os valores médios de reflectância das bandas B04, B05, B06, B07, B08 e B08A, correspondentes às regiões do vermelho, red edge e infravermelho próximo, espectralmente mais sensíveis à atividade fotossintética (Drusch *et al.,* 2012; Liang *et al.,* 2022). Esses dados foram organizados em séries temporais e submetidos à análise gráfica no ambiente estatístico R, utilizando os pacotes *tidyverse*, *ggplot2* e *patchwork*, para construção de painéis comparativos da evolução da resposta espectral da superfície aquática ao longo do período monitorado.

Os resultados espectrais foram interpretados em conjunto com informações de campo, registros fotográficos, relatórios técnicos de fiscalização ambiental e documentos oficiais relacionados ao lançamento irregular de efluentes no entorno do reservatório. Essa integração permitiu correlacionar as alterações observadas na assinatura espectral com eventos de enriquecimento nutricional e ações posteriores de manejo da biomassa vegetal.

Resultados e Discussão

A análise multitemporal das imagens orbitais revelou alteração substancial na dinâmica espectral e na cobertura superficial da Represa São Lourenço ao longo do período monitorado. Durante os anos de referência (2022 a 2024), o reservatório apresentou comportamento compatível com predomínio de espelho d'água livre, com baixos valores de reflectância nas bandas do infravermelho próximo e do red edge, indicando reduzida presença de biomassa flutuante (Figura 2). Em 30 de setembro de 2024, utilizado como marco de condição basal, a reflectância média registrada na banda B04 foi de 0,0249, enquanto a banda B08 apresentou 0,0590. Esse padrão é característico de superfícies aquáticas com baixa interferência de vegetação, nas quais a água absorve grande parte da energia incidente nas regiões do vermelho e, sobretudo, do infravermelho próximo. A partir de fevereiro de 2025 observa-se a ruptura desse equilíbrio espectral (Figura 2). Embora a banda B04 tenha mantido variação relativamente discreta, as bandas associadas ao red edge e ao infravermelho próximo passaram a registrar incrementos progressivos, evidenciando aumento da atividade fotossintética superficial. Em 13 de agosto de 2025, a banda B08 atingiu reflectância média de 0,2494, quadruplicando em relação à condição basal de 2024. O ápice foi observado em 10 de setembro de 2025, quando a mesma banda alcançou 0,3195 (Figura 2). Esse crescimento simultâneo também foi verificado nas bandas B05, B06, B07 e B08A, cuja resposta espectral está intimamente relacionada à densidade de clorofila, ao espalhamento interno da radiação pela estrutura foliar e ao vigor fisiológico da biomassa (Liang *et al.,* 2022; Villa *et al.,* 2015). A elevação coordenada dessas bandas confirma que a superfície anteriormente dominada por água passou a comportar-se, do ponto de vista radiométrico, como uma cobertura vegetal contínua.

A evolução do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (Figura 3; Tabela 1) reforça quantitativamente a mudança detectada nas bandas individuais. Durante a fase de referência, os valores medianos do NDVI mantiveram-se predominantemente negativos ou próximos de zero, refletindo a dominância do espelho d'água. Em 30 de setembro de 2024, a mediana registrada foi de -0,1149, valor típico de superfícies líquidas sem cobertura vegetal significativa. Em fevereiro de 2025, a mediana do NDVI elevou-se para 0,1720, indicando os primeiros sinais de estabelecimento de biomassa fotossinteticamente ativa. Embora ainda distante da saturação, esse incremento representa o início do processo de colonização superficial (Figura 3).

Entre junho e agosto de 2025, verifica-se a fase de crescimento acelerado, quando o índice passa de 0,1461 para 0,7713 em menos de dois meses. O pico máximo foi registrado em 10 de setembro de 2025, com mediana de 0,8008 e média de 0,7824, valores compatíveis com densa cobertura vegetal contínua (Figura 3). Em termos de interpretação espectral, tais índices indicam que a maior parte da área útil do reservatório deixou de responder como lâmina d'água e passou a apresentar comportamento semelhante ao de vegetação terrestre de alta biomassa (Rouse *et al.,* 1973; Villa *et al.,* 2015). A cobertura de macrófitas, em análise visual, chegou a corresponder a praticamente totalidade da área da represa (Figura 4), fato observado pela comunidade e que resultou em ações do Ministério Público de Santa Catarina (Inquérito Civil n. 06.2025.00004464-9) com o intuito de identificar e cessar a/as atividades poluentes.

A persistência de valores elevados em novembro de 2025 (mediana de 0,7381; Tabela 1) demonstra que o processo de infestação não constituiu um episódio pontual, mas uma fase de estabilidade ecológica sob condições de elevada disponibilidade nutricional. A distribuição estatística observada pelos percentis também reforça essa interpretação: o percentil 10 passou de -0,3110 em 2024 para 0,7480 em setembro de 2025 (Tabela 1), evidenciando que até mesmo os setores menos vegetados do

reservatório se encontravam amplamente colonizados. Após as ações de remoção física da biomassa realizadas no final de 2025, observou-se expressiva retração dos valores em 2026. Em 23 de abril de 2026, a mediana do NDVI retornou para -0,0130, indicando restabelecimento parcial do espelho d'água e redução substancial da cobertura superficial por macrófitas (Figura 3; Tabela 1). Entretanto, a permanência de valores máximos próximos de 0,90 sugere a existência de focos residuais ativos nas margens e zonas de menor circulação, fato observado através de atividades de campo no mês de abril, onde é observado acúmulo de macrófitas em grandes regiões da represa (Figura 5).

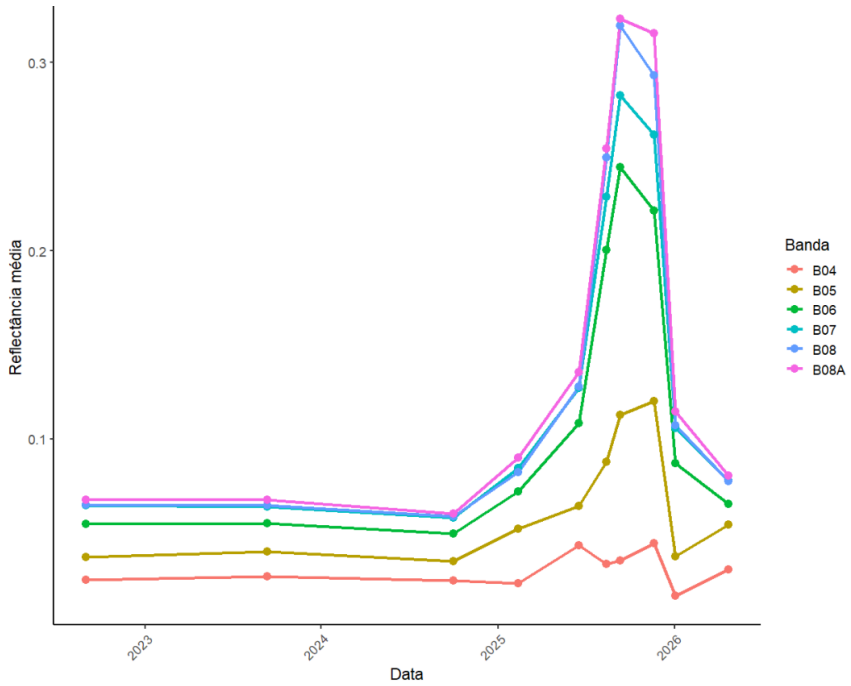


Figura 2. Evolução temporal dos valores médios de reflectância das bandas espectrais B04 (665 nm), B05 (705 nm), B06 (740 nm), B07 (783 nm), B08 (842 nm) e B08A (865 nm) extraídos da área delimitada da Represa São Lourenço entre setembro de 2022 e abril de 2026, evidenciando o incremento progressivo da resposta espectral associada ao aumento da biomassa fotossinteticamente ativa durante o evento de eutrofização.

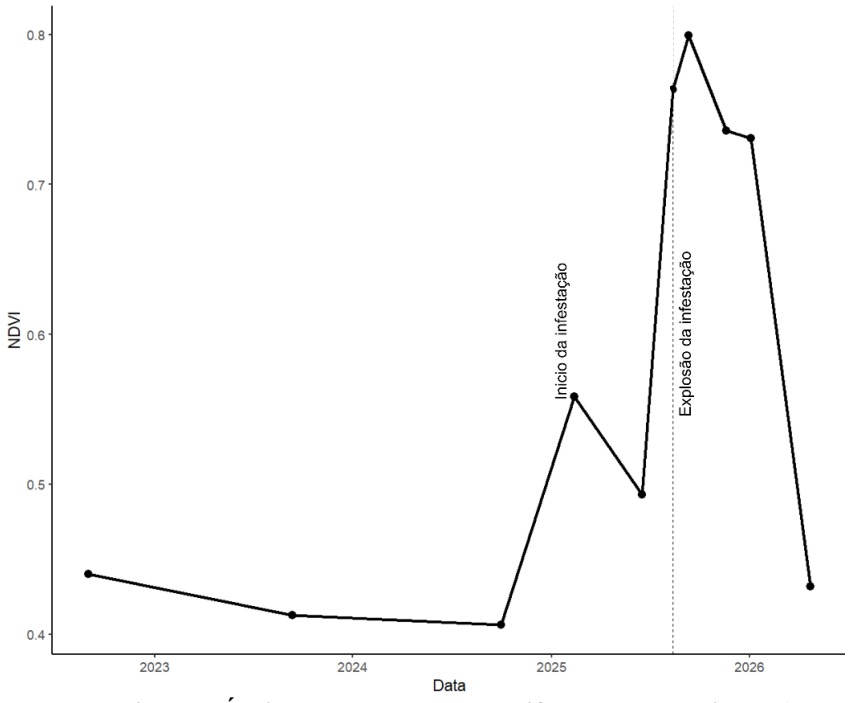


Figura 3. Série temporal da mediana do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) obtida para a área total da Represa São Lourenço entre setembro de 2022 e abril de 2026, evidenciando a transição entre a condição basal de espelho d'água, o rápido aumento da biomassa fotossinteticamente ativa durante o evento de eutrofização em 2025 e a redução parcial dos valores após as ações de manejo no ano de 2026.

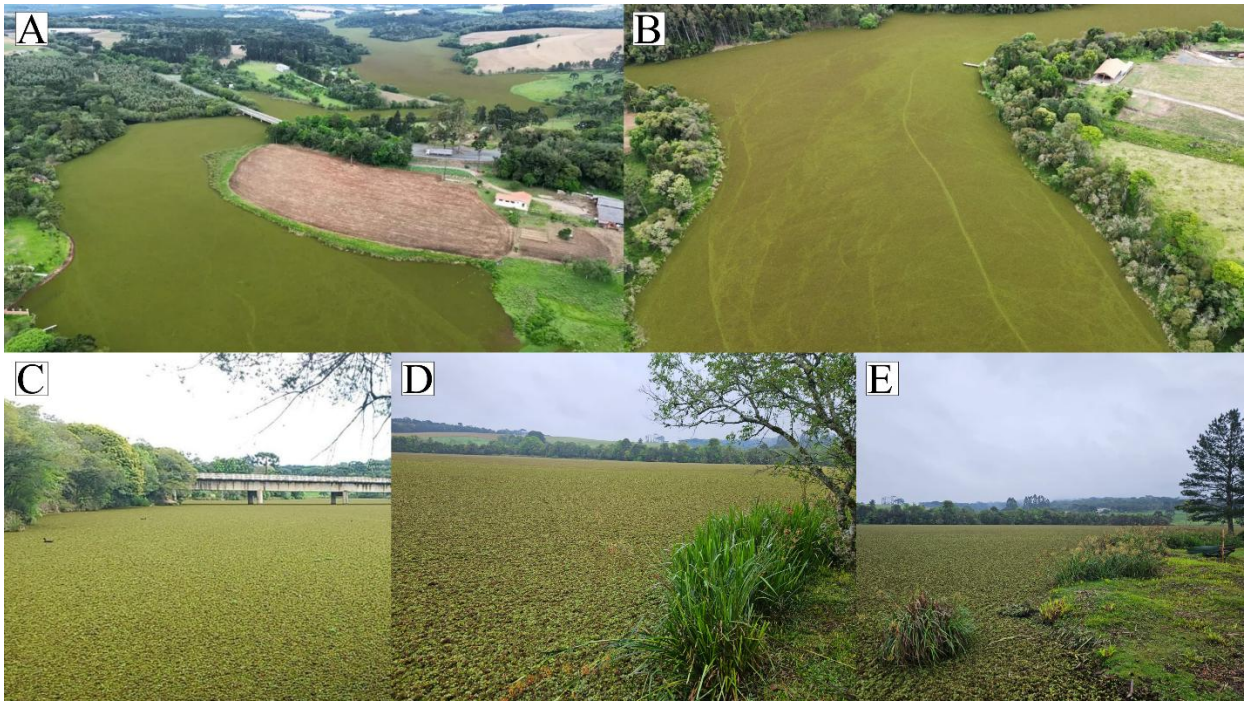


Figura 4. Registros fotográficos representativos da condição de eutrofização avançada observada na Represa São Lourenço entre agosto e novembro de 2025, com predominância de cobertura contínua por macrófitas flutuantes, confirmando visualmente a saturação espectral indicada pelos elevados valores de NDVI obtidos no mesmo período A-C. fotos de 29 de outubro de 2025, de Marlon Haaben; D-E. Fotografias de 03 de outubro de 2025, dos autores.

Os padrões observados na Represa São Lourenço encontram respaldo em estudos recentes de sensoriamento remoto aplicados ao monitoramento de vegetação aquática e ambientes eutrofizados (Villa *et al.,* 2015; Rowan; Kalacska, 2021; Liang *et al.,* 2022). Trabalhos utilizando séries temporais do satélite Sentinel-2 demonstram que a combinação entre bandas do vermelho, red edge e infravermelho próximo permite discriminar com elevada sensibilidade a expansão de biomassa fotossinteticamente ativa em superfícies alagadas, especialmente em sistemas com baixa circulação hidráulica e alta disponibilidade de nutrientes.

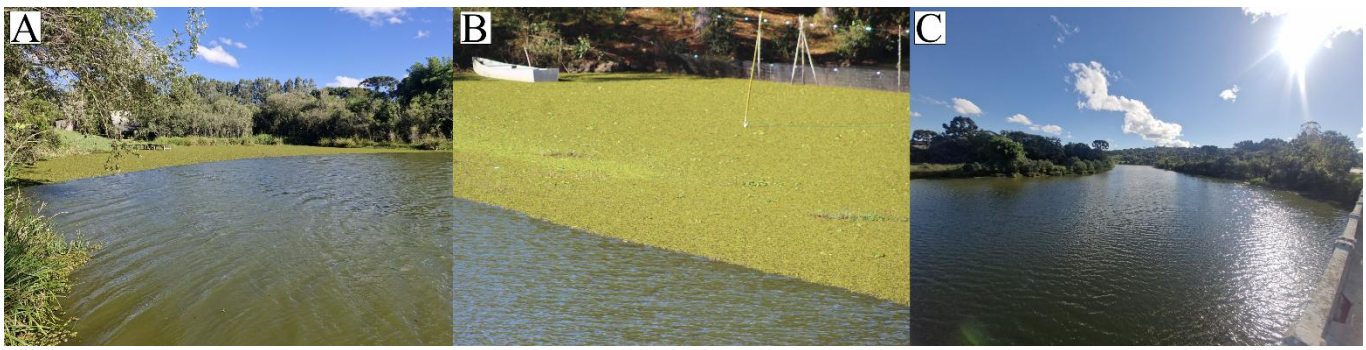


Figura 5. Registros fotográficos da Represa São Lourenço obtidos em abril de 2026, evidenciando a condição pós-manejo do reservatório, com redução substancial da cobertura contínua por macrófitas aquáticas e permanência de focos localizados de biomassa vegetal nas margens e setores de menor circulação hídrica.

Liang *et al.* (2022), ao monitorarem vegetação aquática em lago raso eutrofizado, verificaram que o incremento das bandas B05, B06, B07 e B08 está diretamente associado ao aumento da densidade de cobertura vegetal flutuante e submersa, produzindo assinaturas espectrais muito distintas em relação ao espelho d'água livre. De maneira semelhante, o presente estudo registrou elevação sincronizada dessas bandas entre junho e setembro de 2025, evidenciando que a infestação por macrófitas na Represa São Lourenço promoveu mudança radiométrica expressiva em toda a superfície do reservatório. A resposta observada para o NDVI também converge com aplicações recentes em reservatórios e planícies inundáveis. Estudos de dinâmica espaço-temporal demonstram que valores de NDVI superiores a 0,2 já indicam estabelecimento de vegetação fotossinteticamente ativa, enquanto faixas acima de 0,4 a 0,5 são compatíveis com densidade vegetal elevada e contínua. Em ambientes aquáticos rasos e eutrofizados, limiares acima de 0,7 costumam representar situação de saturação da biomassa flutuante, na qual a água deixa de constituir o principal elemento espectral detectado pelo sensor orbital.

Data	NDVI min	NDVI max	NDVI média	NDVI Desvio	NDVI mediana	NDVI p10	NDVI p90
01/09/2022	-0.4399	0.8596	0.1726	0.3655	0.0204	-0.2397	0.7050
11/09/2023	-0.4649	0.8627	0.1409	0.3761	-0.0579	-0.2307	0.7101
30/09/2024	-0.6725	0.8527	0.0947	0.4007	-0.1149	-0.3110	0.7108
12/02/2025	-0.6060	0.8920	0.2456	0.4054	0.1720	-0.2249	0.7986
17/06/2025	-0.6942	0.8916	0.1621	0.5664	0.1461	-0.4988	0.8433
13/08/2025	-0.5327	0.8888	0.6959	0.2335	0.7713	0.5336	0.8051
10/09/2025	-0.3101	0.9042	0.7824	0.1061	0.8008	0.7480	0.8332
19/11/2025	-0.6666	0.8719	0.6973	0.1753	0.7381	0.6255	0.7846
03/01/2026	-1	0.9043	0.3578	0.4493	0.4692	-0.2136	0.8402
23/04/2026	-0.6772	0.9009	0.1457	0.4348	-0.0130	-0.3239	0.7549

Tabela 1. Estatísticas descritivas do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) obtidas para a área total da Represa São Lourenço entre setembro de 2022 e abril de 2026, incluindo valores mínimo, máximo, média, desvio padrão, mediana e percentis 10 e 90, utilizados para caracterizar a evolução temporal da cobertura por biomassa fotossinteticamente ativa no reservatório.

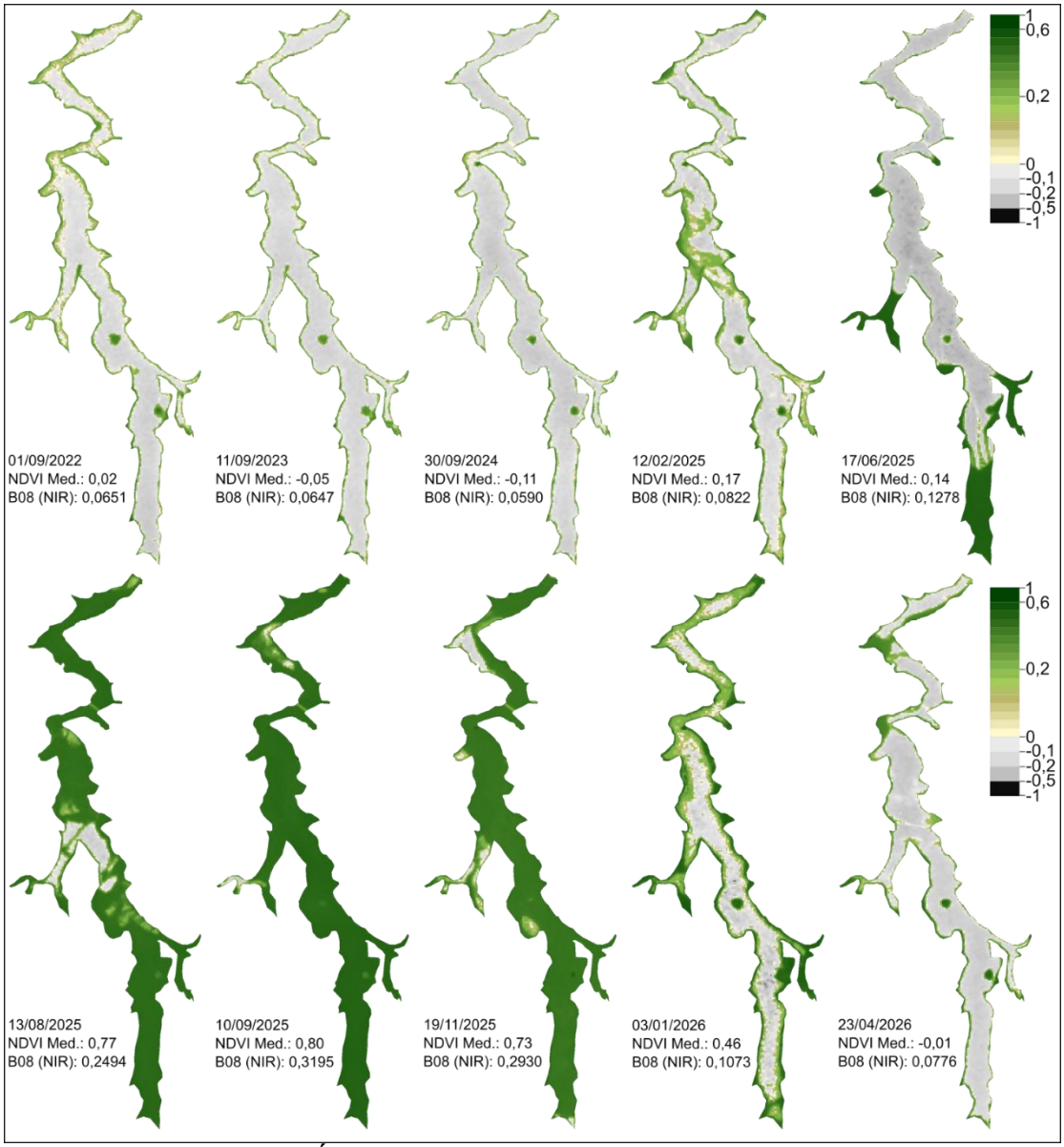


Figura 4. Mapas multitemporais do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para a Represa São Lourenço em datas representativas do monitoramento, especificadas na figura.

Nesse contexto, o valor mediano de 0,8008 obtido em setembro de 2025 (Tabela 1) revela condição extrema de colonização, indicando que a infestação por macrófitas não se restringiu a manchas marginais, mas configurou cobertura superficial praticamente contínua. Tal magnitude é coerente com descrições de reservatórios impactados por eutrofização severa, nos quais a disponibilidade crônica de nitrogênio e fósforo acelera o metabolismo vegetal e reduz drasticamente a resiliência do sistema hídrico.

Outro aspecto relevante refere-se à velocidade de transição detectada pela série temporal. O intervalo inferior a sete meses entre a condição de baixa cobertura (NDVI mediano = 0,1720 em fevereiro de 2025) e a saturação espectral (0,8008 em setembro de 2025; Figura 3; Tabela 1) demonstra a elevada responsividade de macrófitas flutuantes a pulsos de enriquecimento nutricional (Cary; Weerts, 1983; Thomaz; Bini, 1998). Estudos em reservatórios eutrofizados indicam que espécies oportunistas apresentam crescimento exponencial quando encontram simultaneamente temperaturas favoráveis, lâmina d'água estável e excesso de nutrientes dissolvidos, produzindo alterações abruptas detectáveis por sensores ópticos de revisita curta. Sob o ponto de vista da gestão ambiental, os resultados confirmam a aplicabilidade do NDVI como ferramenta operacional de alerta precoce. A literatura recente tem destacado que o monitoramento contínuo por Sentinel-2 permite não apenas mapear espacialmente a infestação, mas também identificar o momento crítico de ruptura ecológica, subsidiando decisões quanto à necessidade de remoção mecânica, contenção de fontes poluidoras e priorização de áreas de intervenção.

No caso da Represa São Lourenço, a forte redução dos índices após o manejo demonstra que a metodologia empregada foi sensível tanto para detectar a expansão quanto para registrar a retração da biomassa, evidenciando o potencial do sensoriamento remoto como instrumento de acompanhamento pós-intervenção. Tal cenário representa comprometimento direto da qualidade do corpo hídrico e de seus usos múltiplos, em desacordo com os parâmetros gerais de conservação previstos pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Dessa forma, além de constituir evidência científica da degradação ambiental ocorrida em 2025, a série temporal produzida neste estudo estabelece uma linha metodológica replicável para outros reservatórios hidrelétricos sujeitos a processos semelhantes de eutrofização.

Além da relevância ecológica, os resultados obtidos possuem implicações diretas para a gestão e fiscalização ambiental de reservatórios artificiais, uma vez que a série temporal construída permite identificar com precisão o período de ruptura da estabilidade limnológica, documentar a magnitude espacial da infestação e fornecer evidências quantitativas passíveis de subsidiar processos de monitoramento institucional, responsabilização de fontes poluidoras e planejamento de medidas corretivas por concessionárias e órgãos de controle.

Considerações finais

A análise multitemporal conduzida na Represa São Lourenço demonstrou que o uso integrado de imagens orbitais Sentinel-2, índices espectrais de vegetação e estatísticas zonais constitui metodologia robusta para o monitoramento de processos de eutrofização e infestação por macrófitas em reservatórios artificiais. A resolução espacial e a frequência de revisita do sensor mostraram-se adequadas para registrar, com elevada sensibilidade, as rápidas alterações biofísicas ocorridas na superfície aquática entre a condição de equilíbrio e a fase de saturação por biomassa vegetal. Os resultados evidenciaram uma transição espectral inequívoca entre o cenário basal observado até 2024 e a condição crítica registrada no segundo semestre de 2025, quando a mediana do NDVI atingiu 0,8008 e as bandas do infravermelho próximo apresentaram incremento superior a quatro vezes em relação à condição de referência. Tais valores confirmam a ocorrência de colonização superficial generalizada por vegetação aquática fotossinteticamente ativa, compatível com quadro severo de enriquecimento nutricional do reservatório.

A retração parcial dos índices após as ações de manejo implementadas no final de 2025 demonstrou, adicionalmente, que a abordagem metodológica adotada não se restringe ao diagnóstico da infestação, sendo igualmente eficiente para o acompanhamento de respostas pós-intervenção. Essa capacidade de registrar tanto a expansão quanto a redução da biomassa amplia significativamente o potencial do sensoriamento remoto como ferramenta contínua de avaliação ambiental.

Do ponto de vista aplicado, o estudo reforça que o NDVI derivado de produtos Sentinel-2 Bottom-of-Atmosphere apresenta elevado potencial como instrumento de alerta precoce em sistemas lênticos sujeitos ao aporte antrópico de nutrientes, permitindo identificar o momento de ruptura ecológica antes que a infestação atinja níveis críticos de manejo (Rowan; Kalacska, 2021; Liang *et al.,* 2022). Discussões técnicas recentes em monitoramento orbital de corpos hídricos têm ressaltado justamente essa capacidade de séries temporais harmonizadas em detectar anomalias abruptas de vegetação e blooms superficiais com baixo custo operacional e alta repetibilidade. Conclui-se, portanto, que a metodologia proposta apresenta elevada aplicabilidade para reservatórios hidrelétricos de pequeno e médio porte, podendo subsidiar órgãos ambientais, concessionárias de energia e instituições de fiscalização na tomada de decisão quanto ao controle de fontes poluidoras, priorização de áreas de intervenção e planejamento de ações de recuperação ambiental. Recomenda-se, para estudos futuros, a integração do monitoramento espectral com análises limnológicas *in situ* e modelagem de nutrientes, visando ampliar a capacidade preditiva sobre novos episódios de proliferação de biomassa aquática.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Agência Espacial Europeia (ESA) e ao programa Copernicus pelo fornecimento gratuito dos dados de satélite Sentinel-2, essenciais para a realização deste monitoramento multitemporal. Agradecemos também aos órgãos de fiscalização ambiental e ao Ministério Público de Santa Catarina (MPSC), cujas investigações e relatórios técnicos serviram de base e motivação para a análise científica dos eventos de eutrofização ocorridos no Rio São Lourenço entre 2024 e 2026.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União: seção 1**, Brasília, DF, n. 53, p. 58–63, 18 mar. 2005.

CARY, P. R.; WEERTS, P. G. J. Growth of *Salvinia molesta* as affected by water temperature and nutrition I. Effects of nitrogen level and nitrogen compounds. **Aquatic Botany**, v.16, n.2, p.163-172, 1983. Doi: https://doi.org/10.1016/0304-3770(83)90091-8

DRUSCH, M. *et al.* Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. **Remote sensing of Environment**, v.120, p.25-36, 2012. Doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026

ESA (European Space Agency). Sentinel-2 MSI data. Copernicus Open Access Hub, 2016-2026.

LIANG, S. *et al.* Accurate monitoring of submerged aquatic vegetation in a macrophytic lake using time-series Sentinel-2 images. **Remote Sensing**, v.14, n.3, p.640, 2022. Doi: https://doi.org/10.3390/rs14030640

MALTHUS, T. J. Bio-optical modeling and remote sensing of aquatic macrophytes. *In* Mishra, D. R., Ogashawara, I.. Gitelson. A. A. **Bio-optical modeling and remote sensing of inland waters**, p. 263-308, 2017. Doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804644-9.00009-4

ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A. AND DEERING, D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite). Proceedings of 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium, Greenbelt, 10-14 December, SP-351, 309-317, 1973.

ROWAN, G. S. L; KALACSKA, M. A review of remote sensing of submerged aquatic vegetation for non-specialists. **Remote Sensing**, v. 13, n. 4, p. 623, 2021. Doi: https://doi.org/10.3390/rs13040623

THOMAZ, S. M.; BINI, L. M. Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas em reservatórios. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v.10, n.1, p.103-116, 1998.

VILLA, P. *et al.* A rule-based approach for mapping macrophyte communities using multi-temporal aquatic vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v.171, p.218-233, 2015. Doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.020.

ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO INSTITUCIONAL DO LICENCIAMENTO AMBIENTAL EM MUNICÍPIOS DA BACIA DO RIO PIRANGA EM MINAS GERAIS

1 Vanessa Gomes Pereira Roque, 2 Paulo Vieira de Castro, 3 Gustavo Luiz Faria Ribeiro
1 UFOP-Universidade Federal De Ouro Preto, e-mail: vanessa.roque@aluno.ufop.edu.br; 2 UFOP-Universidade Federal De Ouro Preto, e-mail: paulovieira@ufop.edu.br; 3 gustavo.lfr@aluno.ufop.edu.br

Palavras-chave: Licenciamento ambiental; Gestão ambiental municipal; Implementação de políticas públicas.

Resumo

O licenciamento ambiental é um dos principais instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente, Lei nº6.938/81, amplamente adotado pelos municípios como mecanismo de controle de atividades potencialmente causadoras de degradação ambiental. Este estudo analisa sua implementação em municípios da circunscrição hidrográfica do rio Piranga (MG), sob a perspectiva jurídico-institucional, à luz da legislação vigente. A metodologia baseia-se em análise qualitativa de normas municipais ambientais, complementada por análise institucional. Foram selecionados, por amostragem intencional, municípios com população superior a 20 mil habitantes: Carandaí, Ervália, Manhuaçu, Ouro Branco, Ouro Preto, Ponte Nova, Raul Soares e Timóteo. Os resultados evidenciaram três padrões de implementação: estruturado, intermediário e de baixa implementação. Nos municípios estruturados, observam-se normas consolidadas, procedimentos definidos e exercício da competência licenciadora. Nos intermediários, há limitações procedimentais e indefinições decisórias. Nos de baixa implementação, verifica-se ausência de regulamentação e não exercício da competência, com dependência de instâncias estaduais. Conclui-se que a efetividade do licenciamento está diretamente relacionada à capacidade institucional local, sendo insuficiente sua mera previsão normativa.

Introdução

A gestão ambiental em nível municipal é essencial para a efetividade da política ambiental brasileira, uma vez que o município constitui o ente federativo mais próximo das dinâmicas territoriais e das demandas socioambientais locais. Nesse contexto, a atuação municipal torna-se estratégica para a identificação, monitoramento e mitigação de impactos ambientais, sobretudo diante da complexidade das questões ambientais contemporâneas, que demandam respostas institucionais articuladas e compatíveis com as especificidades territoriais (Leme, 2022; Barbieri, 2016).

A Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), instituída pela Lei nº 6.938/81, estabelece princípios, objetivos e instrumentos voltados ao desenvolvimento sustentável, estruturando a atuação dos entes federativos de forma integrada (Brasil, 1981; Antunes, 2023). Dentre esses instrumentos, o licenciamento ambiental destaca-se como mecanismo fundamental de controle preventivo de atividades que utilizam recursos naturais e são efetiva ou potencialmente causadoras de degradação ambiental, configurando-se como uma das principais ferramentas de gestão ambiental e desempenhando papel fundamental na compatibilização entre desenvolvimento econômico e proteção ambiental (Milani *et al*., 2025).

Apesar de sua relevância, a implementação dos instrumentos da PNMA ainda enfrenta desafios no âmbito municipal, associados à insuficiência de capacidade técnica e institucional e à complexidade das questões ambientais, fatores que comprometem a efetividade da gestão ambiental local (Leme, 2022). Além disso, a indefinição de competências entre os entes federativos e limitações na articulação do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) dificultam a coordenação entre os diferentes níveis de governo, enfraquecendo os mecanismos de controle e fiscalização ambiental (Antunes, 2023).

A efetividade da política ambiental depende não apenas da existência de instrumentos normativos, mas sobretudo de sua implementação institucional. Sob a perspectiva das políticas públicas, a operacionalização de instrumentos como o licenciamento ambiental envolve capacidades técnicas, coordenação federativa e estrutura administrativa adequada, sendo a fase de implementação um dos principais desafios para a concretização das políticas ambientais (Secchi, 2013; Leme, 2022).

Neste contexto, os modelos de implementação de políticas públicas dividem-se em duas abordagens principais: *top-down* e *bottom-up*. A perspectiva *top-down* compreende a implementação como um processo hierárquico, baseado na execução das diretrizes definidas pelas instâncias centrais, com ênfase no controle e na fidelidade ao planejamento. Já a abordagem *bottom-up* destaca o papel dos agentes locais, entendendo a implementação como um processo dinâmico, marcado por adaptações às condições socioterritoriais e pela atuação dos implementadores como coprodutores da política. Neste estudo, adota-se como referência analítica a abordagem *top-down*, privilegiando a análise das diretrizes normativas e sua correspondência com a implementação em nível municipal (Secchi, 2013).

Embora a PNMA tenha sido instituída há mais de quatro décadas, ainda são escassos os estudos sobre sua implementação prática em nível municipal, especialmente em recortes territoriais específicos, como a circunscrição hidrográfica do rio Piranga. Nesse contexto, torna-se relevante analisar como os municípios têm incorporado o licenciamento ambiental em seus arranjos jurídico-institucionais.

A promulgação da Lei nº 15.190/2025, ao estabelecer novas diretrizes para o licenciamento ambiental, reforça a necessidade de compreender a capacidade institucional dos municípios para operacionalizar esse instrumento, especialmente diante dos riscos de flexibilização em contextos de baixa estrutura administrativa.

Diante desse contexto, torna-se fundamental compreender como os municípios têm estruturado o licenciamento ambiental em seus ordenamentos jurídicos, especialmente frente às novas exigências normativas, de modo a avaliar sua capacidade de implementação e efetividade. Assim, o presente estudo tem como objetivo analisar a implementação do licenciamento ambiental em municípios da circunscrição hidrográfica do rio Piranga, em Minas Gerais, a partir da avaliação de seus arranjos jurídico-institucionais, buscando identificar lacunas, limitações e potencialidades na operacionalização desse instrumento.

O estudo tem como recorte territorial a circunscrição hidrográfica do rio Piranga, integrante da bacia do rio Doce, unidade relevante do ponto de vista socioambiental, composta por 77 municípios e marcada pela importância estratégica de seus recursos hídricos para o abastecimento, atividades produtivas e manutenção da biodiversidade regional. A região apresenta desafios significativos relacionados à gestão ambiental, evidenciados por baixos índices de desenvolvimento sustentável em grande parte dos municípios (CBH-DOCE, 2023).

Para a análise, foram selecionados, por meio de amostragem intencional e não probabilística, os municípios de Carandaí, Ervália, Manhuaçu, Ouro Branco, Ouro Preto, Ponte Nova, Raul Soares e Timóteo, localizados na referida circunscrição hidrográfica. A seleção considerou municípios com população superior a 20 mil habitantes, de acordo com dados do Censo Demográfico de 2022, divulgados pelo IBGE, visando contemplar contextos urbanos mais representativos e potencialmente sujeitos a maior pressão sobre os instrumentos de gestão ambiental.

Material e Métodos

A pesquisa adota abordagem qualitativa, com base em análise de casos múltiplos, visando investigar a implementação do licenciamento ambiental em municípios da circunscrição hidrográfica do rio Piranga. A metodologia fundamenta-se em análise normativa e institucional, a partir de leis orgânicas, leis ordinárias, leis complementares e decretos obtidos nos sítios eletrônicos oficiais das prefeituras e câmaras municipais. Esses sítios também subsidiaram o levantamento de informações sobre órgãos ambientais, conselhos municipais, sistemas municipais de meio ambiente, competências administrativas, procedimentos de licenciamento e articulação federativa, em observância à transparência ativa prevista na Lei nº 12.527/2011.

A análise dos dados foi conduzida com base na técnica de análise de conteúdo, conforme proposta por Laurence Bardin (2020), compreendendo três etapas: pré-análise, exploração do material e tratamento, inferência e interpretação dos resultados. A adoção da análise de conteúdo encontra respaldo em estudos recentes que demonstram sua aplicabilidade à análise jurídico-institucional de políticas públicas. Pereira e Machado (2024) evidenciam que a aplicação dessa técnica permite a construção de procedimentos sistemáticos e generalizáveis para a investigação de normas jurídicas e documentos institucionais.

Na fase de pré-análise, realizou-se a seleção e organização do conjunto documental, composto por normas municipais de natureza ambiental obtidas nos sítios oficiais das prefeituras e câmaras municipais, no período de agosto de 2025 a abril de 2026. O conjunto inicial compreendeu 30.224 normas, das quais 413 foram pré-selecionadas com base em pertinência temática, resultando na análise de 131 unidades de registro relacionadas ao licenciamento ambiental. Embora a pré-seleção tenha considerado diferentes instrumentos da PNMA, o presente estudo adota recorte analítico exclusivo sobre o licenciamento ambiental.

A triagem foi realizada por busca manual orientada por palavras-chave, como “licenciamento ambiental”, “meio ambiente” e termos correlatos, nos mecanismos de busca dos sítios institucionais, além de leitura exploratória dos documentos. Não foram utilizadas ferramentas computacionais automatizadas ou softwares de mineração de dados. Nos casos de ementas genéricas, como “altera dispositivos de lei anterior”, “dispõe sobre a organização administrativa do Município” ou “dá outras providências”, procedeu-se à leitura direcionada do corpo da norma para verificar a existência de conteúdo relacionado ao licenciamento ambiental ou a outros instrumentos da PNMA.

Na etapa de exploração do material, procedeu-se à leitura dirigida das normas pré-selecionadas para identificação dos dispositivos relacionados ao licenciamento ambiental. Foram consideradas unidades de registro os artigos, incisos, parágrafos ou alíneas que apresentavam conteúdo normativo associado a exigências, procedimentos, competências, condicionantes, estudos ambientais, autorizações ou formas de regularização vinculadas ao controle prévio da instalação, operação ou funcionamento de empreendimentos e atividades potencialmente poluidoras ou utilizadoras de recursos ambientais. A identificação dessas unidades considerou o conteúdo jurídico-material dos dispositivos, não se restringindo à ocorrência literal da expressão “licenciamento ambiental”. Os dados foram sistematizados em planilha eletrônica, contendo informações sobre município, norma, unidade de registro e classificação quanto à presença e estruturação do licenciamento ambiental.

A partir dessa etapa, foram construídas categorias analíticas voltadas à compreensão da estrutura normativa do licenciamento ambiental, em procedimento semelhante ao adotado por Azevedo (2023), que utilizou a análise de conteúdo para codificação, classificação e categorização de dados, embora com enfoque empírico-institucional, enquanto a presente pesquisa se concentra na análise documental-normativa das legislações municipais. A análise foi orientada por categorias analíticas que contemplam as dimensões normativa, procedimental e institucional do licenciamento ambiental, permitindo não apenas identificar a presença formal do instrumento, mas também avaliar o grau de sua institucionalização e funcionamento em nível local.

As categorias analíticas adotadas compreenderam: (i) previsão normativa, referente ao grau de sistematização das normas municipais; (ii) estrutura procedimental, relativa à existência de etapas, modalidades e fluxos do licenciamento; (iii) órgão ambiental, correspondente à existência de unidade administrativa formal responsável pela gestão ambiental; (iv) conselho ambiental, referente à presença de instância colegiada consultiva ou deliberativa; (v) instância decisória, relativa à forma de tomada de decisão no processo; e (vi) competência para licenciar, analisada à luz da Lei Complementar nº 140/2011 e, em Minas Gerais, da Deliberação Normativa COPAM nº 213/2017.

A competência para licenciar foi classificada conforme o exercício da atribuição administrativa pelos municípios, seja de forma originária, delegada ou não exercida, considerando também a possibilidade de cooperação intermunicipal e celebração de convênios.

Na fase de tratamento dos resultados, os municípios foram classificados quanto ao grau de implementação do licenciamento ambiental em três categorias: *pouco estruturado*, *intermediário* e *estruturado*, conforme o grau de detalhamento, organização e integração normativa identificado.

A classificação segue a lógica semelhante adotada por Abreu e Peres (2024), que avaliam o Licenciamento Ambiental Municipal a partir da *ausência*, *presença parcial* ou *presença* de regulamentação dos componentes normativos do instrumento. Assim, considerou-se como **pouco estruturado** os municípios em que as normas fazem referência ao licenciamento ambiental de forma pontual, sem definição de procedimentos, competências ou estrutura administrativa associada. A categoria **intermediário** abrange aqueles em que as normas apresentam previsão do instrumento acompanhada de elementos de regulamentação, como indicação de competências ou menção a procedimentos, porém de forma parcial ou não sistematizada. Já a categoria **estruturado** corresponde aos casos em que se verifica regulamentação normativa consolidada, expressa por meio de leis municipais acompanhadas de atos regulamentares, como decretos, com definição clara de competências, procedimentos administrativos, instâncias decisórias e integração com outros instrumentos da política ambiental.

A abordagem *top-down* foi operacionalizada pela análise da incorporação do licenciamento ambiental nas normas municipais, considerando sua previsão legal, regulamentação procedimental, competências administrativas e articulação com a política ambiental local, conforme a compreensão de implementação como execução de diretrizes previamente definidas pelas instâncias normativas (Secchi, 2013).

A análise baseou-se no levantamento documental de legislações, planos e estruturas administrativas, com foco na identificação de dispositivos relacionados ao licenciamento ambiental, permitindo avaliar a capacidade institucional local e o grau de implementação desse instrumento.

Resultados e Discussão

A partir da análise de conteúdo das legislações municipais e da identificação de elementos institucionais, como existência de órgão ambiental, conselho deliberativo, definição de competências e estrutura procedimental, foi possível identificar três padrões principais de implementação do licenciamento ambiental. A identificação desses padrões decorre da análise de conteúdo das normas municipais, permitindo a construção de categorias empíricas de implementação, elaboradas a partir dos dados analisados, conforme os procedimentos metodológicos propostos por Laurence Bardin (2020).

Essa classificação permitiu comparar não apenas a existência formal do licenciamento ambiental nas normas municipais, mas também o modo como o instrumento se encontra institucionalmente organizado em cada município. Assim, a análise considerou a articulação entre previsão normativa, estrutura procedimental, instâncias administrativas e exercício da competência licenciadora, de modo a distinguir situações de regulamentação consolidada, implementação parcial e baixa operacionalização do instrumento.

A Tabela 1 sintetiza os elementos normativos e institucionais identificados e fundamenta a classificação dos municípios quanto ao grau de implementação do licenciamento ambiental.

Município	Previsão normativa	Estrutura procedimental	Órgão ambiental	Conselho ambiental	Instância decisória	Competência p/ licenciar	Classificação
Carandaí	Estruturada	Estruturada	Presente	Presente (deliberativo)	Mista	Originária	Estruturado
Ervália	Dispersa	Não estruturada	Presente	Presente (deliberativo)	Colegiada	Não exerce	Não estruturado
Manhuaçu	Estruturada	Estruturada	Presente	Presente (deliberativo)	Mista	Originária	Estruturado
Ouro Branco	Estruturada	Estruturada	Presente	Presente (deliberativo)	Mista	Originária (Delegação estadual)	Estruturado
Ouro Preto	Parcial	Inexistente	Presente	Presente (deliberativo)	Inexistente	Não exerce	Intermediário
Ponte Nova	Estruturada	Parcial	Presente	Presente (deliberativo)	Mista	Originária (Delegação estadual)	Estruturado
Raul Soares	Estruturada	Estruturada	Presente	Presente (deliberativo)	Mista	Originária (Consórcio)	Estruturado
Timóteo	Dispersa	Inexistente	Presente	Presente (deliberativo)	Indefinida	Originária	Intermediário

Tabela 1 - Síntese da análise normativa e institucional do licenciamento ambiental nos municípios da bacia do rio Piranga (MG) Fonte: Elaboração dos autores, com base em normas municipais, dados institucionais obtidos nos sítios eletrônicos oficiais das prefeituras e câmaras municipais (2025–2026) e informações do Sistema Municipal de Meio Ambiente de Minas Gerais (Minas Gerais, 2024).

A partir dessa classificação, os municípios foram organizados em três grupos analíticos, apresentados a seguir.

O primeiro grupo corresponde aos municípios com **estrutura consolidada de licenciamento ambiental** - Carandaí, Manhuaçu, Ouro Branco, Ponte Nova e Raul Soares -, nos quais se observa a presença simultânea de base normativa estruturada, órgão ambiental definido, conselho deliberativo e procedimentos administrativos organizados. Nesses casos, as normas municipais evidenciam leis e atos regulamentares que delimitam competências, etapas do processo e instâncias decisórias, caracterizando maior grau de institucionalização do instrumento e arranjos compatíveis com as diretrizes do SISNAMA.

Entre os municípios estruturados, Raul Soares apresenta arranjo diferenciado por exercer a competência licenciadora por meio de consórcio intermunicipal, demonstrando que a implementação do licenciamento pode ocorrer não apenas por estruturas próprias, mas também por mecanismos de cooperação institucional. Já Ouro Branco e Ponte Nova foram classificados como municípios com competência "originária com delegação estadual", pois exercem simultaneamente atribuições municipais e competências estaduais de licenciamento, controle e fiscalização ambiental, conforme registro no SIMMA-MG. Esses arranjos

indicam maior abrangência administrativa e reforçam a relevância da cooperação e da descentralização para ampliar a capacidade institucional local, especialmente em contextos de limitações técnicas e administrativas.

De forma geral, o desempenho desse grupo está associado à combinação entre base normativa consolidada, órgãos ambientais institucionalizados, conselhos deliberativos e mecanismos de cooperação, fatores reconhecidos pela literatura como relevantes para a implementação de políticas ambientais em nível municipal (Zagallo, 2022; Nascimento *et al*., 2023; Nicollier *et al*., 2023).

O segundo grupo abrange municípios com **implementação intermediária do licenciamento ambiental**, caracterizados pela existência de estrutura administrativa e instrumentos normativos, bem como pelo exercício da competência licenciadora em nível local, ainda que com limitações quanto à sistematização normativa e à organização procedimental. Nesse contexto, insere-se o município de Timóteo, no qual, apesar da presença de órgão ambiental, instância colegiada e atuação no licenciamento, observam-se fragmentação normativa e ausência de detalhamento procedimental. Dessa forma, a estrutura procedimental foi classificada como "inexistente", em razão da ausência de regulamentação específica que estabeleça, de forma sistematizada, as etapas, modalidades e fluxos do processo de licenciamento ambiental. Ademais, a instância decisória foi classificada como "indefinida", considerando que, embora exista conselho ambiental com caráter deliberativo, não se verifica, nas normas analisadas, a definição clara de sua atuação no processo de licenciamento, nem a delimitação entre as funções técnicas e decisórias no âmbito administrativo, o que pode resultar em limitações operacionais, como indefinição de responsabilidades, ausência de fluxos processuais padronizados e maior discricionariedade na condução dos processos, restringindo a efetividade do instrumento.

Por fim, o terceiro grupo é composto por municípios com **baixa implementação do licenciamento ambiental**, nos quais, embora existam elementos institucionais mínimos, como órgão ambiental e conselho municipal, não se observa o exercício efetivo da competência licenciadora em nível local. Inserem-se nesse grupo os municípios de Ervália e Ouro Preto, nos quais o licenciamento ambiental é conduzido predominantemente por instâncias estaduais, evidenciando dependência institucional e limitações na autonomia municipal para a implementação do instrumento.

A estrutura procedimental do município de Ervália foi classificada como não estruturada, em razão da ausência de regulamentação específica que defina etapas, modalidades ou fluxos do processo de licenciamento ambiental, bem como da inexistência de dispositivos que estabeleçam de forma clara a organização procedimental e a distribuição de competências no âmbito administrativo, o que reforça a inexistência de um procedimento administrativo formalmente instituído para a condução do licenciamento ambiental no município.

No caso de Ouro Preto, destaca-se, adicionalmente, a inexistência de instância decisória municipal voltada ao licenciamento ambiental, uma vez que o município não conduz diretamente o processo licenciador, atuando de forma complementar por meio da emissão de certidões ou manifestações administrativas, sem competência para deliberar sobre a concessão de licenças, o que reforça a ausência de exercício da competência licenciadora em nível local. Em outro ponto a previsão normativa desse município foi classificada como parcial, uma vez que, embora existam normas ambientais e instrumentos de controle no âmbito municipal, não se verifica a regulamentação específica e sistematizada do licenciamento ambiental como procedimento administrativo próprio. Ademais, a estrutura procedimental foi classificada como inexistente, considerando a ausência de definição formal de etapas, modalidades ou fluxos do processo de licenciamento no âmbito municipal.

A análise comparativa dos municípios evidencia que os elementos normativos, procedimentais e institucionais não se distribuem de forma homogênea, configurando arranjos distintos de implementação do licenciamento ambiental. Nos municípios classificados como estruturados, observa-se convergência entre base normativa consolidada, definição clara de competências administrativas e existência de instâncias decisórias articuladas, o que favorece a operacionalização do instrumento. Por outro lado, nos municípios com implementação intermediária, identifica-se dissociação entre a previsão normativa e a capacidade institucional, resultando em limitações na condução dos processos de licenciamento ou dependência de instâncias estaduais. Esse cenário pode estar associado a fatores como limitações técnico-administrativas, insuficiência de regulamentação procedimental e fragilidade na definição de fluxos decisórios, elementos apontados pela literatura como condicionantes da capacidade de implementação de políticas ambientais em nível local esse resultado é consistente com estudos que destacam a influência da capacidade institucional, da estrutura administrativa e da governança local na efetividade do licenciamento ambiental municipal (Silva; Vasconcellos Sobrinho, 2025; Abreu; Peres, 2024; Nascimento *et al*., 2023).

A heterogeneidade observada entre os municípios analisados indica que a implementação do licenciamento ambiental em nível local não depende exclusivamente de sua previsão normativa, resultado que, no âmbito desta pesquisa, decorre da análise comparativa das dimensões normativa, procedimental e institucional. Esse achado é consistente com a literatura, que destaca a centralidade da capacidade institucional e administrativa dos entes municipais para a efetividade da gestão ambiental descentralizada (Leme, 2022; Nascimento *et al*., 2023; Nicollier *et al*., 2023).

Em síntese, os resultados evidenciam diferenças relevantes entre municípios com estrutura consolidada de licenciamento e aqueles com lacunas normativas, procedimentais ou institucionais. Essas diferenças se expressam, sobretudo, na capacidade de condução dos processos de licenciamento, na articulação com outros entes federativos e na existência de arranjos institucionais capazes de sustentar a implementação do instrumento, em consonância com estudos que destacam a influência da capacidade institucional, da estrutura administrativa e da governança local na efetividade do licenciamento ambiental municipal (Silva; Vasconcellos Sobrinho, 2025; Abreu; Peres, 2024; Nascimento *et al*., 2023).

Os resultados também podem ser interpretados à luz da governança ambiental multinível, na qual a implementação de políticas públicas depende da interação entre diferentes esferas de governo e da capacidade dos entes federativos de exercerem suas competências. Essa dinâmica é evidenciada nos municípios analisados, nos quais se observam diferentes arranjos institucionais: desde casos com maior autonomia e estruturação do licenciamento ambiental, até situações de dependência de instâncias estaduais

ou de atuação complementar. Sob essa perspectiva, a descentralização do licenciamento ambiental pressupõe não apenas a transferência de atribuições, mas o fortalecimento das capacidades institucionais locais, sob pena de produção de assimetrias territoriais na aplicação do instrumento (Senise, 2023). Tais assimetrias são verificadas, por exemplo, na comparação entre municípios com estrutura consolidada e aqueles com implementação intermediária ou baixa, nos quais limitações procedimentais, indefinições decisórias ou ausência de exercício da competência comprometem a efetividade do licenciamento em nível local.

No contexto da Política Nacional do Meio Ambiente, tais diferenças refletem os desafios inerentes à descentralização da gestão ambiental no Brasil, na qual os municípios assumem papel relevante na execução dos instrumentos ambientais, especialmente o licenciamento, porém com níveis distintos de autonomia e capacidade institucional (Moura; Bezerra, 2016; Leme, 2022; Nicollier *et al*., 2023). A partir desse resultado, a classificação dos municípios e as limitações procedimentais e decisórias identificadas evidenciam que a efetividade do licenciamento ambiental em nível municipal está condicionada não apenas à sua previsão normativa, mas à consolidação de arranjos institucionais capazes de viabilizar sua implementação.

As mudanças introduzidas pela Lei nº 15.190/2025 reforçam a relevância dos resultados encontrados, pois a ampliação da autonomia municipal e a adoção de procedimentos simplificados exigem capacidade institucional compatível com a responsabilidade decisória atribuída aos entes locais. Nos municípios analisados que já apresentam estrutura normativa, órgão ambiental atuante, conselho deliberativo e procedimentos definidos, essas mudanças tendem a encontrar condições mais favoráveis de implementação. Por outro lado, nos casos de implementação intermediária ou baixa, marcados por lacunas procedimentais, indefinição decisória ou dependência de instâncias estaduais, a flexibilização pode ampliar fragilidades e comprometer a função preventiva do licenciamento ambiental.

Milani *et al*. (2025) alertam que a flexibilização do licenciamento, quando não acompanhada de capacidade técnica e institucional adequada, pode ampliar assimetrias regulatórias, reduzir o protagonismo de órgãos técnicos e colegiados, fragilizar a participação social e deslocar o controle ambiental para fases posteriores, especialmente em modalidades simplificadas ou autodeclaratórias. Nos municípios com implementação intermediária ou baixa, esses riscos são mais relevantes, pois as limitações procedimentais e decisórias já identificadas podem comprometer a função preventiva do licenciamento ambiental.

Considerações Finais

O presente estudo analisou a implementação do licenciamento ambiental em municípios da circunscrição hidrográfica do rio Piranga, evidenciando a existência de diferentes níveis de institucionalização desse instrumento no âmbito municipal. A partir da análise normativa e institucional, foram identificados padrões distintos de implementação, que variam desde municípios com estrutura consolidada até aqueles com baixa capacidade operacional ou atuação indireta no licenciamento ambiental.

Os resultados indicam que a efetividade do licenciamento ambiental em nível local está diretamente relacionada à capacidade institucional dos municípios, incluindo a existência de estrutura administrativa especializada, definição clara de competências e organização dos procedimentos. Observou-se que a simples previsão normativa do instrumento não é suficiente para garantir sua implementação, sendo necessária a consolidação de arranjos institucionais que viabilizem sua operacionalização.

A análise ganha relevância diante das recentes mudanças promovidas pela Lei Geral do Licenciamento Ambiental, que introduz mecanismos de simplificação e amplia a autonomia dos entes federativos. Embora tais medidas possam contribuir para maior celeridade dos processos, os achados deste estudo indicam que, em contextos de baixa capacidade institucional, a flexibilização pode acentuar fragilidades já existentes, ampliando assimetrias na aplicação do instrumento e comprometendo sua função preventiva.

Nesse contexto, a ampliação da autonomia decisória exige fortalecimento técnico e institucional dos municípios, sob pena de reduzir o rigor das análises ambientais, fragilizar a atuação de órgãos colegiados e comprometer a função preventiva do licenciamento ambiental (Milani *et al*., 2025).

Este estudo contribui para a literatura ao propor uma tipologia empírica de implementação do licenciamento ambiental em nível municipal, baseada na análise normativa e institucional de casos reais. Ao evidenciar que a capacidade institucional é fator determinante para a efetividade dos instrumentos ambientais, reforça-se que a existência formal do licenciamento não garante sua operacionalização.

Como limitação, destaca-se que a análise se baseia predominantemente em dados documentais, não contemplando a investigação empírica direta dos processos de licenciamento ou da atuação dos agentes envolvidos. Assim, embora seja possível avaliar a estrutura normativa e institucional dos municípios, não se permite aferir integralmente a efetividade prática do instrumento.

Cabe destacar que a Lei Geral do Licenciamento Ambiental constitui marco normativo recente, ainda em processo de regulamentação pelos entes federativos, o que implica que seus efeitos práticos sobre a organização e a implementação do licenciamento ambiental em nível local ainda se encontram em consolidação.

Nesse sentido, pesquisas futuras podem aprofundar a análise por meio de abordagens empíricas, incluindo entrevistas com gestores públicos, análise de processos administrativos e avaliação de resultados ambientais, contribuindo para uma compreensão mais abrangente da efetividade do licenciamento ambiental.

Conclui-se que o fortalecimento institucional dos municípios constitui elemento central para a efetividade do licenciamento ambiental no Brasil, sendo fundamental o investimento em capacidade técnica, organização administrativa e coordenação federativa. Os resultados reforçam que avanços normativos devem ser acompanhados por estratégias que garantam a adequada implementação dos instrumentos ambientais em nível local, sob pena de comprometer sua função preventiva e regulatória no contexto da gestão ambiental descentralizada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e ao Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental pelo apoio institucional e pelas condições proporcionadas para o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ABREU, Emanoele Lima; PERES, Renata Bovo. **Licenciamento ambiental municipal (LAM): regulamentação urbano-ambiental em cidades médias de São Paulo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 15., 2024, Belém. Anais [...]. Belém: IBEAS, 2024. Disponível em: https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2024/V-009.pdf

ANTUNES, Paulo de Bessa. **Direito ambiental**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2023.

AZEVEDO, Jordana Morais. **Licenciamento ambiental municipal e sua relação com a Política Nacional do Meio Ambiente**. 2023. Dissertação (Mestrado em Administração Pública) – Fundação Getulio Vargas, Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/9a9fd15b-b78d-4ded-813c-694e4b8d217d/content

BARBIERI, José Carlos. **Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos**. São Paulo: Saraiva, 2016.

BARDIN, Laurence. **Análise de conteúdo**. 5. ed. Lisboa: Edições 70, 2020.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm

BRASIL. **Lei nº 12.527, de 18 de novembro de 2011**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/l12527.htm

BRASIL. **Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp140.htm

BRASIL. **Lei nº 15.190, de 8 de agosto de 2025**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/lei/l15190.htm

CARANDAÍ (MG). **Prefeitura Municipal**. Disponível em: https://carandai.mg.gov.br/

CARANDAÍ (MG). **Câmara Municipal**. Disponível em: https://camaracarandai.mg.gov.br/

CBH-DOCE. COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE. **Plano integrado de recursos hídricos da bacia do rio Doce**. São Paulo, 2023. Disponível em: https://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2023/10/1454-ANA-07-RH-RT-0001-R4_Doce.pdf

ERVÁLIA (MG). **Prefeitura Municipal**. Disponível em: https://www.ervalia.mg.gov.br/

ERVÁLIA (MG). **Câmara Municipal**. Disponível em: https://www.camaraervalia.mg.gov.br/

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativa da população do Brasil e unidades da federação. 2025**. Disponível em: https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2025/POP2025_20260113.pdf

LEME, Taciana Neto. **Os municípios e a Política Nacional do Meio Ambiente**. Planejamento e Políticas Públicas, Brasília, n. 60, 2022. Disponível em: https://ipea.gov.br/ppp/index.php/PPP/article/view/196

MANHUAÇU (MG). **Prefeitura Municipal**. Disponível em: https://www.manhuacu.mg.gov.br/

MANHUAÇU (MG). **Câmara Municipal**. Disponível em: https://www.manhuacu.mg.leg.br/

MILANI, F. C. et al. **O novo marco legal do licenciamento ambiental no Brasil: uma análise crítica da Lei nº 15.190/2025**. Revista da Escola Superior do Ministério Público da União, v. 3, n. 2, p. e-32001, 2026. DOI: https://doi.org/10.63601/resmpu.2025.v2.n3.e-32001

MINAS GERAIS. COPAM. **Deliberação Normativa nº 213, de 22 de fevereiro de 2017**. Disponível em: https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=43778

MINAS GERAIS. SEMAD; FEAM. **Sistema Municipal de Meio Ambiente de Minas Gerais (SIMMA-MG)**. 2024. Disponível em: https://publico.armazem.quasar.srv.br/pentaho/api/repos/quasarSIMMA/app/index.htm. Acesso em: 6 abr. 2026.

MOURA, Alexandrina Sobreira de; BEZERRA, Maria do Carmo. **Governança e sustentabilidade das políticas públicas no Brasil**. In: Governança ambiental no Brasil: instituições, atores e políticas públicas. Brasília: Ipea, 2016. p. 1-20. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9267/1/Governan%c3%a7a%20e%20sus tentabilidde.pdf

NASCIMENTO, Alexandre Túlio Amaral; DOS SANTOS, Thaís Mara Monteiro; DE OLIVEIRA, Anderson Rodrigues; LOBO, Farley Rocha; MAGNO, Juliana Nascimento; CRISTOFOLI, Gustavo Tofanin. **Desafios e oportunidades da urbanização sustentável e da gestão ambiental municipal em 88 cidades do estado de Minas Gerais, Brasil**. Desenvolvimento e Meio Ambiente, [S. l.], v. 62, 2023. DOI: 10.5380/dma.v62i0.82515.

NICOLLIER, V.; KIPERSTOK, A.; BERNARDES, M. E. C. **A governança das águas no Brasil: qual o papel dos municípios?** Estudos Avançados, 37(109), 279-302. https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2023.37109.017

OURO BRANCO (MG). **Prefeitura Municipal**. Disponível em: https://www.ourobranco.mg.gov.br/

OURO BRANCO (MG). **Câmara Municipal**. Disponível em: https://www.ourobranco.cam.mg.gov.br/

OURO PRETO (MG). **Prefeitura Municipal**. Disponível em: https://www.ouropreto.mg.gov.br/

OURO PRETO (MG). **Câmara Municipal**. Disponível em: https://cmop.mg.gov.br/

PEREIRA, Pablo Rangell Mendes Rios; MACHADO, Bruno Amaral. **A análise de conteúdo na análise jurídico-institucional**. Revista Direito e Práxis, v. 15, n. 4, p. 1–32, 2024. https://doi.org/10.1590/2179-8966/2024/73281

PONTE NOVA (MG). **Prefeitura Municipal**. Disponível em: https://www.pontenova.mg.gov.br/

PONTE NOVA (MG). **Câmara Municipal**. Disponível em: https://www.pontenova.mg.leg.br/

RAUL SOARES (MG). **Prefeitura Municipal**. Disponível em: https://www.raulsoares.mg.gov.br/

RAUL SOARES (MG). **Câmara Municipal**. Disponível em: https://cmraulsoares.mg.gov.br/

SILVA, Everton Sales da; VASCONCELLOS SOBRINHO, Mário. **Transparência e licenciamento ambiental municipal**. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v. 20, n. 1, p. 1–34, 2025. Disponível em: https://remunom.ojsbr.com/multidisciplinar/article/view/5492. Acesso em: 18 de abril de 2026.

SECCHI, Leonardo. **Políticas públicas: conceitos, esquemas de análise e casos práticos**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

SENISE, Walter José. **Política Nacional do Meio Ambiente- PNMA- Lei 6.938/1981- Lei do Meio Ambiente sem Política Nacional**. In: SILVA, Bruno C.; GURGEL, Carlos S.; THAMAY, Rennan (org.). Direito e política ambiental no Brasil: estudos em homenagem ao Professor José Afonso da Silva. São Paulo: Almedina, 2023. E-book. p. 50-68. ISBN 9786556279312. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786556279312/. Acesso em: 18 jun. 2025.

TIMÓTEO (MG). **Prefeitura Municipal**. Disponível em: https://www.timoteo.mg.gov.br/

TIMÓTEO (MG). **Câmara Municipal**. Disponível em: https://www.timoteo.mg.leg.br/

ZAGALLO, Sofia Araújo. **Sustentabilidade municipal: orientações para a gestão ambiental**. Brasília: CNM, 2022. Disponível em: https://cnm.org.br/storage/biblioteca/2022/Livros/2022_LIV_MAMB_Sustentabilidade_municipal_orientacoes_gestao_ambiental.pdf. Acesso em: 23 de maio de 2025.

DIAGNÓSTICO DOS PASSIVOS AMBIENTAIS EM ÁREAS PROTEGIDAS DOS IMÓVEIS RURAIS IMPACTADOS COM REJEITOS DE MINERAÇÃO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

1 Fernanda Maia Oliveira, 2 Paulo de Castro Vieira

1 Instituto Interamericano de Cooperação pela Agricultura - IICA, fernamdam.oliveira@apoio.mda.gov.br; 2 Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, paulovieira@ufop.edu.br

Palavras-chave: Diagnóstico ambiental; Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal.

Resumo

Este trabalho teve como objetivo diagnosticar os passivos ambientais em Áreas de Preservação Permanente e Reservas Legais de imóveis rurais impactados pela deposição de rejeitos da barragem de Fundão (Samarco), localizados às margens do rio Gualaxo do Norte (MG). Foram analisados dados do Cadastro Ambiental Rural (CAR) de 174 imóveis, selecionados por critérios de área (inferior a 4 módulos fiscais) e presença de atividades agrossilvipastoris, totalizando 6,7 mil hectares. Utilizou-se geoprocessamento (QGIS) e organização de banco de dados para mensurar passivos, seguindo as regras da Lei nº 12.651/2012 e do Decreto Estadual nº 48.127/2021. Os resultados indicam que 91% dos imóveis são pequenos (≤4 MF) e ocupam 41% da área total. A cobertura nativa remanescente é de 31%, enquanto áreas consolidadas somam 59%. As APP representam 18% da área (~1.200 ha), das quais 36% estão preservadas, 338 ha exigem restauração obrigatória (Art. 61A) e 421 ha podem permanecer em uso consagrado pela legislação para pequenos imóveis. As RL declaradas equivalem a 19% da área (~1.300 ha); 81 imóveis apresentam déficit, porém apenas 4 (com área >4 MF) precisam recompor 80,8 ha, estando os demais dispensados. Para atender ao Programa de Regularização Ambiental (PRA), estima-se a restauração de 186 ha no primeiro ano e o restante em até cinco anos, totalizando necessidade de cerca de 603 mil mudas nativas (espaçamento 3x2 m). Conclui-se que a flexibilização legal é crucial para a permanência da agricultura familiar, mas impõe desafios à recuperação ecológica integral. Recomendam-se políticas de fomento à produção de mudas, sistemas agroflorestais e assistência técnica como estratégias complementares à restauração

Introdução

Este diagnóstico visou contribuir para a compreensão, mensuração e reparação dos passivos ambientais existentes nos imóveis rurais situados ao longo da calha do rio Gualaxo do Norte, nos municípios de Mariana e Barra Longa. Por causa do impacto sofrido com o rompimento da Barragem de Fundão, de propriedade da mineradora Samarco, no dia 15 de novembro de 2015. Nessa data, os rejeitos de minério de ferro atingiram o rio Gualaxo do Norte, cerca de 34 milhões de m³ de rejeitos saíram da área de propriedade da Samarco (BRASIL, 2015) e aproximadamente 26,5 milhões de m³ ficaram depositados até a barragem da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (Candonga), localizada entre os municípios mineiros de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado. Outros 5,5 milhões de m³ seguiram o fluxo dos cursos d'água nos 537 quilômetros até a foz do rio Doce, em Regência, Espírito Santo (FUNDAÇÃO RENOVA, 2021a).

Centenas de imóveis rurais que desenvolviam atividades agrossilvipastoris foram diretamente impactados com deposição de rejeito em suas terras, sendo as Áreas de Preservação Permanentes (APPs) desses imóveis, às margens do rio Gualaxo do Norte, as áreas mais afetadas (MARTINS et al., 2020).

Atualmente, essas áreas estão em processo de recuperação pela Fundação Renova, instituição criada por meio de um Termo de Transação de Ajustamento de Conduta para reparar os danos causados pelo rompimento da Barragem de Fundão (FUNDAÇÃO RENOVA, 2021b).

O processo de recuperação dessas áreas impactadas atendeu às disposições trazidas pela Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012, e a Lei Estadual 20.992, de 16 de outubro de 2013, pois estabeleceram regras para a regularização ambiental dos imóveis rurais com finalidade agrossilvipastoris, as quais, segundo Carvalho (2016), trouxeram grandes avanços que permitem aprimorar e expandir a produção agropecuária e, ao mesmo tempo, fomentar a conservação ambiental.

Neste sentido, o Cadastro Ambiental Rural (CAR) é uma ferramenta importante, trazida pelas legislações supracitadas, compondo uma base de informação que permite diagnosticar e 15 mensurar os passivos ambientais existentes em uma área, seja em imóvel rural, municípios, bacias hidrográficas, biomas e no país como um todo (JUNG et al., 2017). Entende-se por passivos ambientais, conforme Art. 5º do Decreto Estadual 48.127/2021, a supressão da vegetação nativa não autorizada em APP e RL, gerados até 22 de julho de 2008, que poderão ser regularizados por meio da adesão ao PRA (LIMA, 2016).

O diagnóstico da área é de fundamental importância, pois esses dados geoambientais indicam o que deve ser restaurado, onde e quando essa restauração ocorrerá. Permite definir os métodos que serão adotados para a sua recomposição, também, mensurar os esforços necessários para criação de incentivos econômicos e sociais, políticas públicas, linhas de crédito, serviços e ganhos ambientais, auxiliando o produtor rural na adequação ambiental do seu imóvel (ZAKIA; PINTO, 2013).

Pela importância do mesmo, a inscrição no CAR, além de obrigatória, foi incentivada pela Lei 12.651/2012. Trata-se da condição para obtenção de uma série de benefícios, garantidos após o cumprimento das ações de recuperação acordadas no Programa de Regularização Ambiental (PRA), tais como a redução das metragens de recomposição e restauração de APPs,

recomposição da RL com plantio intercalado de 50% com espécies exóticas e 50% com nativas, pousio, suspensão de processos administrativos e criminais e a manutenção das atividades agrossilvipastoris consolidadas no imóvel – áreas convertidas até 22 de julho de 2008 (LIMA, 2016).

Desta forma, este trabalho visou levantar o diagnóstico dos passivos ambientais gerados anteriormente a 22 de julho de 2008, conforme marco legal para consolidação do uso alternativo do solo em APPs e RLs presentes nos imóveis impactados com deposição de rejeito de mineração ao longo da calha principal do rio Gualaxo do Norte, nos municípios de Mariana e Barra Longa, a partir dos dados declarados no CAR, buscando apresentar as possibilidades legais para a regularização dessas áreas protegidas.

Materiais e Métodos

A pesquisa adotou abordagens quantitativa e qualitativa, fundamentando-se na análise dos dados geoambientais declarados no Cadastro Ambiental Rural (CAR) de 174 imóveis rurais. Essas propriedades localizam-se ao longo da calha do rio Gualaxo do Norte, nos municípios de Mariana e Barra Longa (MG), área diretamente impactada pelo rompimento da barragem de Fundão (Figura 1).



Figura 1: Localização da Bacia Hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.
Fonte: Minas Gerais (2017)

Foram selecionados todos os imóveis com área inferior a quatro módulos fiscais (MF) e, complementarmente, propriedades maiores que apresentassem atividades agrossilvipastoris identificáveis por meio de imagens de satélite, totalizando uma área amostral de aproximadamente 6,7 mil hectares (BRASIL, 2021b).

Os dados foram obtidos por meio de download público no Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR), utilizando os códigos individuais de cada imóvel. Para o tratamento e a análise espacial, empregou-se o software livre Quantum Gis (QGIS), que permitiu a extração das camadas vetoriais de cada propriedade, incluindo limites do imóvel, hidrografia, remanescentes de vegetação nativa, áreas de uso consolidado e propostas de Reserva Legal. Todas as coordenadas foram mantidas no sistema de referência SIRGAS 2000, garantindo a consistência dos cálculos de área.

Os procedimentos metodológicos incluíram a organização de um banco de dados em Excel a partir dos dados vetoriais extraídos do CAR (BRASIL, 2021b), contemplando: área do imóvel, módulo fiscal, remanescentes de vegetação nativa, uso consolidado, Áreas de Preservação Permanente (APP) totais e do Art. 61A, APP com vegetação nativa e antropizadas não consolidadas, além das Reservas Legais (RL) declaradas. Os cálculos dos passivos ambientais seguiram as diretrizes da Lei Federal nº 12.651/2012 (BRASIL, 2012) e do Decreto Estadual nº 48.127/2021 (MINAS GERAIS, 2021a), que regulamenta o Programa de Regularização Ambiental (PRA) em Minas Gerais.

Para delimitação das áreas consolidadas, utilizaram-se imagens de satélite anteriores a 22 de julho de 2008, marco legal para definição das obrigações de recomposição. A mensuração das áreas consolidadas em APP foi realizada conforme a equação:

APP Consolidada = APP Total – APP Vegetação nativa – APP Art. 61A – APP Antropizada (1)

Onde a APP Antropizada corresponde à supressão da vegetação ocorrida após 22 de julho de 2008.

Os passivos em RL foram calculados comparando-se a área declarada no CAR com o percentual mínimo de 20% da área total do imóvel, considerando as regras de dispensa de recomposição para imóveis menores que 4 MF (CARVALHO, 2016).

Além disso, foram identificadas e classificadas as nascentes e os cursos d'água declarados, e as respectivas faixas de APP foram calculadas automaticamente pelo sistema SICAR com base na largura dos rios e nas regras do Art. 61A para áreas consolidadas. Para cada imóvel, foram extraídos os valores de APP total, APP Art. 61A (restauração obrigatória), APP com vegetação nativa e APP não consolidada (supressão após 2008). A partir desses dados, calculou-se a área de restauração obrigatória como a soma da APP Art. 61A com a APP não consolidada, e a área consolidada que permanecerá em uso pela diferença entre APP total e as demais categorias.

Os resultados foram apresentados em tabelas, gráficos e mapas, estratificados por faixas de MF (0 a 1, 1 a 2, 2 a 4 e >4 MF), contemplando percentuais de imóveis, áreas ocupadas, passivos ambientais e áreas a serem restauradas. Essa estratificação permitiu avaliar o impacto diferenciado da legislação sobre pequenos e grandes imóveis rurais, bem como verificar a aplicação das dispensas de recomposição previstas para propriedades com até quatro módulos fiscais.

Resultados e Discussão

Os resultados evidenciam a predominância de pequenas propriedades rurais na área de estudo. Dos 174 imóveis analisados, 91% possuem área inferior a quatro módulos fiscais (MF), representando 41% da área total avaliada, que abrange 6.623,6 hectares. Os imóveis acima de 4 MF correspondem a apenas 9% do total, mas ocupam 49% da área amostrada, padrão semelhante aos dados nacionais e do bioma Mata Atlântica (BRASIL, 2021a). Este padrão fundiário influencia diretamente a aplicação das regras de regularização ambiental, especialmente no que se refere à flexibilização das obrigações de recomposição previstas na legislação vigente.

A análise da cobertura do solo revelou que 31% da área total (2.116,54 ha) encontram-se ocupados por remanescentes de vegetação nativa, enquanto 59% (4.074 ha) correspondem a áreas consolidadas com uso agrossilvipastoril anterior a 22 de julho de 2008. Destaca-se que 52% da vegetação nativa pertencem aos imóveis com área superior a 4 MF. As Áreas de Preservação Permanente (APP) totais somam 1.233,45 hectares, correspondendo a 18% da área total amostrada, evidenciando a relevância dessas áreas para a manutenção das funções ecossistêmicas na região. Deste total, 450 hectares (36%) estão cobertos por vegetação nativa preservada. As áreas de restauração obrigatória, representadas pelas APPs do Art. 61A, totalizam 338,13 hectares, às quais se somam 23,99 hectares de APPs antropizadas não consolidadas (conversões após 2008), resultando em 362,17 hectares passíveis de restauro florestal.

A aplicação da equação de consolidação permitiu identificar que 421,22 hectares de APP permanecerão em uso, sendo que 74% destas áreas estão localizadas em imóveis com área inferior a 4 MF. Este resultado evidencia a importância da flexibilização das regras gerais de APP para a continuidade das atividades agrossilvipastoris em pequenas propriedades (CARVALHO, 2016).

Quando se analisa a distribuição dos passivos ambientais por faixa de módulo fiscal, observa-se que os imóveis com área superior a 4 MF concentram a maior parte das áreas de restauração obrigatória em APP: 235,95 hectares dos 338,13 ha totais (cerca de 70%). Em contrapartida, os imóveis de até 1 MF somam apenas 22,64 ha de passivo em APP, e aqueles entre 1 e 2 MF, 27,80 ha. Essa disparidade reflete tanto a maior extensão territorial das grandes propriedades quanto a maior incidência de cursos d'água e nascentes em suas áreas. No entanto, é justamente nos pequenos imóveis que a consolidação do uso da APP se mostra mais permissiva: neles, a legislação permite a manutenção de até 421,22 ha de uso consolidado, o que representa 74% de toda a área de APP que continuará sendo utilizada para agropecuária. Essa flexibilização, embora necessária para a viabilidade socioeconômica da agricultura familiar, reduz o potencial de restauração ecológica integral das zonas ripárias, especialmente em uma bacia hidrográfica já severamente impactada pelo rejeito de mineração.

A síntese das áreas de restauração obrigatória identificadas no estudo é apresentada no Quadro 1.

Categoria de área protegida	Área (ha)	Observações
APP Total	~1.200	Corresponde à 18% da área total
APP com vegetação nativa	~430	Aproximadamente 36% das APP
APP com restauração obrigatória (Art. 61ª)	~338	Áreas degradadas ou alteradas a serem restauradas
APP passível de manutenção de uso (APP consolidada)	~421	Uso permitido para pequenos imóveis rurais
RL total declarada	~1.300	Corresponde a 19% da área total
RL com déficit para recomposição	~80,82	Área obrigatória para recomposição de RL

Quadro 1: Áreas de restauração obrigatória em APP e RL nos imóveis analisados. Fonte: Elaborado a partir dos dados do CAR

As Reservas Legais declaradas totalizam 1.292,54 hectares (19% da área total). O cálculo de 20% sobre a área de cada imóvel indicou uma área passível de RL de 1.324,73 hectares, evidenciando um pequeno déficit geral. Foram identificados 81 imóveis com déficit de RL, entretanto, apenas quatro apresentam obrigatoriedade de recomposição, totalizando cerca de 80,82 hectares, em função das regras que dispensam pequenos imóveis da recomposição integral. Os demais 77 imóveis com déficit estão dispensados da recomposição por serem menores que 4 MF e já não possuírem vegetação suficiente em 22 de julho de 2008. Os 95 imóveis com excedente de vegetação podem constituir Cotas de Reserva Ambiental (CRAs), conforme previsto na legislação (RAJÃO et al., 2015). Este cenário reforça a relevância das disposições legais na modulação das exigências ambientais, especialmente em contextos de predominância de agricultura familiar.

Contudo, o elevado número de imóveis com déficit de RL que foram dispensados da recomposição (77 imóveis, totalizando 115,27 ha de vegetação nativa que deixará de ser restaurada) representa uma perda significativa de oportunidade para a conectividade de fragmentos florestais e para a prestação de serviços ecossistêmicos, como polinização, controle de erosão e regulação hídrica.

Além da quantificação das áreas, a análise dos prazos estabelecidos para recomposição no âmbito do Programa de Regularização Ambiental (PRA) permite compreender a dinâmica temporal da restauração. Conforme diretrizes legais, a recuperação das áreas degradadas deve ocorrer de forma escalonada, considerando a capacidade operacional dos produtores e os limites estabelecidos pela legislação. Considerando os prazos estabelecidos pelo Decreto Estadual 48.127/2021 para implantação da restauração dos passivos ambientais, o Quadro 2 apresenta a estimativa de implantação da restauração das áreas de APP ao longo do tempo.

Período de implantação	Área estimada (ha)	Observações
1º ano	~186	Prioridade para as áreas mais críticas
2º ao 5º ano	~152	Restauração gradual dos passivos remanescentes
TOTAL	~338	Área total de APP a ser restaurada

Quadro 2: Prazos para implantação da restauração dos passivos ambientais em APP no âmbito do PRA.
Fonte: Elaborado a partir dos dados do estudo.

Outro aspecto fundamental diz respeito ao cumprimento dos prazos do PRA. O Decreto Estadual 48.127/2021 exige que passivos de até 1 hectare sejam restaurados em até 3 anos; passivos entre 1 e 5 hectares, em até 6 anos (com recuperação de 1/3 da área a cada 2 anos); e passivos superiores a 5 hectares, em até 10 anos (com 1/5 da área a cada 2 anos). Na área de estudo, 34,8 hectares de passivo enquadram-se na primeira faixa, 72,11 ha na segunda e 255,25 ha na terceira. Isso significa que, já no primeiro ano, aproximadamente 186 hectares devem estar em processo de restauração, demandando ações imediatas de planejamento, preparo do solo e plantio. A concentração dos maiores passivos em poucos imóveis (acima de 4 MF) pode facilitar a fiscalização e a prestação de assistência técnica, mas também requer um esforço concentrado de restauração, com técnicas que vão desde o plantio total até a condução da regeneração natural e o enriquecimento de áreas em transição.

Utilizando o espaçamento de 3 x 2 m (1.667 mudas/ha), conforme recomendado pelo Manual Técnico do PRA-MG (MINAS GERAIS, 2021c), estima-se a necessidade de aproximadamente 603 mil mudas para suprir apenas os passivos em APP dos 174 imóveis amostrados. Deste total, cerca de 310 mil mudas seriam demandadas nos primeiros três anos. Esse volume evidencia a necessidade de estruturar cadeias locais de produção de mudas e sementes nativas, preferencialmente envolvendo agricultores familiares e cooperativas, como forma de gerar renda e garantir a qualidade genética e a adaptação ecológica dos materiais utilizados.

A análise integrada dos dados demonstra que, embora exista volume expressivo de áreas degradadas, a legislação ambiental vigente reduz significativamente a extensão das áreas obrigatórias de restauração, sobretudo em função das regras aplicáveis a áreas consolidadas e pequenos imóveis rurais. Por outro lado, a distribuição temporal das ações de recuperação no âmbito do PRA permite maior viabilidade operacional, porém pode postergar a recomposição plena das funções ecológicas dessas áreas. Esta flexibilização, embora necessária para viabilizar socioeconomicamente a agricultura familiar, pode limitar a recuperação integral das funções ecológicas das áreas protegidas em região impactada por evento de grande magnitude como o rompimento da barragem de Fundão (MARTINS et al., 2020).

Estudos anteriores indicam desafios semelhantes na regularização ambiental. Pacheco et al. (2017) identificaram que 45% dos produtores rurais no Pará e Mato Grosso declararam déficit de vegetação nativa para RL, atribuindo à desmotivação com a legislação ambiental e aos altos custos de regularização. As CRAs surgem como alternativa atrativa para reduzir o déficit de RL sem onerar terras produtivas (MELLO et al., 2021).

A demanda por aproximadamente 603 mil mudas para apenas 174 imóveis evidencia a necessidade de incentivo à produção de mudas e sementes pela agricultura familiar, criação de bancos comunitários de sementes e adoção de técnicas de baixo custo como condução da regeneração natural e sistemas agroflorestais (SAFs) (MICCOLIS et al., 2016; URZEDO et al., 2020). Nesse contexto, destaca-se a necessidade de estratégias complementares, como incentivo à adoção de sistemas agroflorestais, condução da regeneração natural e fortalecimento de políticas públicas de apoio técnico e financeiro. O Relatório de Oportunidades de Restauração da bacia do rio Gualaxo do Norte (FUNDAÇÃO RENOVA; WRI BRASIL, 2020) já aponta caminhos nessa direção, destacando a necessidade de assistência técnica, fortalecimento de cooperativas locais e criação de redes de colaboração. Tais medidas são essenciais para ampliar a efetividade da restauração ambiental e promover a sustentabilidade dos territórios impactados.

Por fim, é importante ressaltar que o prazo de adesão ao PRA encerrou-se em 31 de dezembro de 2020. Os imóveis que não aderiram não poderão usufruir dos benefícios da flexibilização (redução das faixas de restauração, plantio intercalado com exóticas, suspensão de sanções). Isso pode inviabilizar a continuidade das atividades agropecuárias em muitas pequenas propriedades que, mesmo impactadas pelo rejeito, ainda não haviam regularizado sua situação. Portanto, ações de divulgação e apoio à regularização ambiental são estratégicas não apenas para a recuperação ecológica, mas também para a permanência do homem no campo e a manutenção da função social da terra.

Considerações Finais

O diagnóstico realizado permitiu identificar e mensurar os passivos ambientais em áreas legalmente protegidas nos imóveis rurais impactados pelo rompimento da Barragem de Fundão, localizados às margens do rio Gualaxo do Norte. A partir da análise dos dados declarados no Cadastro Ambiental Rural (CAR) de 174 imóveis, verificou-se que apenas dois imóveis não apresentam qualquer passivo ambiental em APP ou RL, sendo considerados ambientalmente adequados. Os demais imóveis somam, conjuntamente, cerca de 338,13 hectares de passivos ambientais em Áreas de Preservação Permanente (APP) de cursos d'água e nascentes, além de 80,82 hectares de passivos em Reserva Legal (RL), totalizando 418,95 hectares passíveis de restauração florestal.

As áreas de restauro em APP e RL mostraram-se mais expressivas nos imóveis com área superior a quatro módulos fiscais (MF), totalizando 316,77 hectares. Embora esses imóveis representem apenas 9% do total analisado, abrangem aproximadamente 50% da área total amostrada, padrão semelhante aos dados nacionais e do bioma Mata Atlântica (BRASIL, 2021a). O restante dos passivos ambientais, cerca de 102,18 hectares, refere-se às APPs de cursos hídricos localizadas em imóveis com área inferior a 4 MF.

Com a aplicação das regras de consolidação do uso do solo em APP, estabelecidas pelo art. 61A da Lei Federal nº 12.651/2012, obteve-se que 421,22 hectares de APP permanecerão em uso, permitindo a continuidade das atividades agrossilvipastoris. Adicionalmente, identificou-se um déficit de 136,27 hectares de Reserva Legal, cuja obrigatoriedade de restauração foi integralmente dispensada por se tratar de imóveis menores que 4 MF. Dessa forma, a consolidação do uso do solo em APP e RL totalizou 536 hectares que permanecerão em produção, evidenciando a importância da flexibilização das regras gerais para a permanência do pequeno produtor rural no campo (CARVALHO, 2016).

Ressalta-se que o prazo de adesão ao Programa de Regularização Ambiental (PRA) encerrou-se em 31 de dezembro de 2020. As novas inscrições no CAR não contarão com os benefícios da flexibilização, o que poderá inviabilizar a continuidade das atividades em imóveis rurais que não aderiram tempestivamente. Para os imóveis que aderiram, as diretrizes do Decreto Estadual nº 48.127/2021 estabelecem que a restauração dos passivos deve ocorrer de forma escalonada: aproximadamente 186 hectares deverão ser recuperados nos primeiros três anos e os demais 176 hectares ao longo dos próximos cinco anos. Utilizando o espaçamento de 3 x 2 m (1.667 mudas por hectare), conforme recomendado pelo Manual Técnico do PRA-MG (MINAS GERAIS, 2021c), estima-se a necessidade de cerca de 603 mil mudas para a restauração apenas das APPs, sendo 310 mil mudas demandadas já nos três anos iniciais.

Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de adoção de estratégias complementares que garantam a efetividade da restauração ambiental sem inviabilizar a pequena produção rural. Recomenda-se o fomento à produção de mudas e sementes pela agricultura familiar, a criação de bancos comunitários de sementes e a utilização de técnicas de baixo custo, como a condução da regeneração natural e os sistemas agroflorestais (SAFs). Além disso, é essencial o fortalecimento de políticas públicas de assistência técnica rural voltadas para a implementação e o monitoramento dos projetos de restauração, bem como a operacionalização do mercado de Cotas de Reserva Ambiental (CRA) e a compensação de passivos por grandes empreendimentos.

Sugere-se, ainda, o desenvolvimento de pesquisas sobre a percepção dos produtores rurais acerca das obrigações legais, a avaliação dos conflitos entre a proteção do bioma Mata Atlântica e a consolidação de usos, e a criação de um protocolo de monitoramento das áreas restauradas. Somente com um esforço integrado entre poder público, setor produtivo e sociedade civil será possível conciliar a reparação integral dos danos causados pelo rompimento da Barragem de Fundão com a sustentabilidade socioeconômica dos territórios impactados.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Renova e ao Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais pelo apoio institucional e pelas informações disponibilizadas, e ao Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto pelo suporte acadêmico e institucional durante o desenvolvimento da pesquisa.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis n.º 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências.

BRASIL, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – Ibama. Laudo Técnico Preliminar Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais.

2015. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_prelimin. Acesso em: 18 out. 2020.

BRASIL, Agência Nacional das Águas, Ministério do Meio Ambiente. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil, informe 2015: Encarte Especial sobre a bacia do rio Doce – Rompimento da Barragem em Mariana / MG. 2016. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/RioDoce/EncarteRioDoce_22_03_2016v2.pdf. Acesso em: 04 ago. 2021.

BRASIL, Serviço Florestal Brasileiro. Boletim Informativo – Cadastro Ambiental Rural: Dados até 31 de dezembro de 2020. Disponível em: <https://www.florestal.gov.br/documentos/car/boletim-do-car/4774-boletim-informativo-abril-2020/file>. Acesso em: 22maio de 2021.

BRASIL, Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural – SICAR. Base cartográfica declaradas no CAR. Disponível em: https://www.car.gov.br/publico/imoveis/index. Acesso em: 19 maio 2021.

CARVALHO, L. A. O Novo Código Florestal Comentado Artigo por Artigo. Curitiba: Juruá. 2016.

FUNDAÇÃO RENOVA. Linha do Tempo – Novembro de 2021a: Movimentação do Rejeito. Apresenta a linha do tempo do Rompimento da Barragem de Fundão. Disponível em: https://www.fundacaorenova.org/linha-do-tempo/?categoria&ano=2015&mes=11&busca . Acesso em: 30 jan. 2021.

FUNDAÇÃO RENOVA. Relatório Anual de Atividades, Ano 2020 – Janeiro 2021b. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/wpcontent/uploads/2021/01/relatorio_anual_de_atividades_2021ref.2020.pdf>. Acesso em: 15 de março de 2021.

FUNDAÇÃO RENOVA; WRI Brasil. Relatório de oportunidades de restauração na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, Minas Gerais, Brasil: Resultados da aplicação da ROAM. coordenação Mariana Oliveira, Vitor Herméto Coutinho Campos. 1. ed. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/arquivos-erelatorios/?search=roam&category=&forum=&data_inicio=&data_fim=>. Acesso em: 09 out 2020.

JUNG, S.; RASMUSSEN, L. V.; WATKINS, C.; NEWTON, P.; AGRAWAL, A. Cadastro Nacional de Propriedades Rurais do Brasil: Implicações para a subsistência. Economia Ecológica, v. 136. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800916308758?via%3Dihub#bb0210>. Acesso em: 24 maio 2021.

LIMA, R. C. Programas de Regularização Ambiental (PRAs): um guia para orientar e impulsionar o processo de regulamentação dos PRAs nos Estados Brasileiros. São Paulo: Agroicone. 2016.

MARTINS, S. V.; VILLA, P. M.; NABETA, F. H.; SILVA, L. F.; KRUSCHEWSKY, G. C.; DIAS, A. A. Study on Site Preparation and Restoration Techniques for Forest Restoration in Mining Tailings of Mariana, Brazil. Research in Ecology. v. 02, p. 42-52, 2020.

MELLO, K.; FENDRICH, A. N.; SPAROVEK, G.; SIMMONDS, J. S.; MARON, M.; TAVARES, P. A.; BRITES, A. D.; RODRIGUES, R. R.; JOLY, C. A.; METZGER, J. P. Achieving private conservation targets in Brazil through restoration and compensation schemes without impairing productive lands. Environmental Science and Policy. v. 120. p. 1-10, 2021.

MICCOLIS, A.; PENEIREIRO, F. M.; MARQUES, H. R.; VIEIRA, D. L. M.; ARCO VERDE, M. F.; HOFFMANN, M. R.; REHDER, T.; PEREIRA, A. V. B. Restauração ecológica com Sistemas Agroflorestais: como conciliar conservação com produção, opções para o Cerrado e Caatinga. Brasília. Instituto Sociedade, População e Natureza – ISPN, Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal – ICRAF, 2016.

MINAS GERAIS. Deliberação nº 4 de 09 ago. de 2017. Comitê Gestor do Zoneamento Ambiental e Produtivo – ZAP. Dispõe sobre a aprovação do Zoneamento Ambiental Produtivo da sub-bacia do rio Gualaxo do Norte.

MINAS GERAIS. DECRETO Nº 48.127, de 26 de janeiro de 2021. Regulamenta, no Estado, o Programa de Regularização Ambiental, previsto na Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012, e na Lei nº 20.922, de 16 de outubro de 2013, e dá outras providências. 2021A.

MINAS GERAIS, INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS. Manual Técnico do Programa de Regularização Ambiental de Minas Gerais – PRA MG. 2021c. Disponível em: <http://www.ief.mg.gov.br/images/stories/2021/REGULARIZACAO_IMOVEIS_RURAIS/Manual_PRA.pdf_Interativo.pdf>. Acesso em: 10 jun. de 2021.

PACHECO, R; RAJÃO, R; SOARES-FILHO, B; VAN DER HOFF, R. Regularization of legal reserve debts: perceptions of rural producers in the state of Pará and Mato Grosso in Brazil. Ambiente e Sociedade, v. 20, n. 02. p. 181-200, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC0012R1V2022017>. Acesso em: 25 ago. 2021.

RAJÃO, R *et. al*. Cotas de reserva ambiental (CRA): viabilidade econômica e potencial do mercado no Brasil. Belo Horizonte: Ed. IGC/UFMG, 2015. p. 72.

URZEDO, D. I.; RODRIGUES, F. C. M. P.; BARBIERI, R. F.; JUNQUEIRA, R. G. P.; FISHER, R. Seed Networks for Upscaling Forest LandscapeRestoration: Is It Possible to Expand Native Plant Sources in Brazil? **Forests,** v.11. 2020.

ZAKIA, M. J.; PINTO, L. F. G. Guia para aplicação da nova lei em propriedades rurais. Piracicaba, SP: Imaflora, 2013.

AVALIAÇÃO DO SUBCRITÉRIO ÍNDICE DE CONSERVAÇÃO DO ICMS ECOLÓGICO PARA MUNICÍPIOS MINEIROS

1 Ana Carolina Viana de Carvalho, 2 Luisa Barbosa Siqueira, 3 Daniel Brianezi
1 CEFET-MG, e-mail: anacarolinaviana97@gmail.com; 2 CEFET-MG; e-mail: luisabsiqueira6@gmail.com ; 3 CEFET-MG, e-mail: brianezi@cefetmg.br

Palavras-chave: Lei Robin Hood; PSA; Unidades de Conservação.

Resumo

O ICMS Ecológico foi criado no Brasil em busca de ser uma política pública de incentivo à preservação ambiental. Teve sua primeira experiência no estado do Paraná e com o tempo foi ampliado para outros estados. A Lei Hobin Hood, instituída em 1995 em Minas Gerais, trouxe novos critérios de distribuição do ICMS Ecológico, buscando levar mais recursos para as regiões mais pobres e aplicando mais recursos municipais nas áreas sociais, além de induzir os municípios a aumentarem a arrecadação e utilizarem-na com mais eficiência. Dois importantes fatores que possibilitam o cálculo de arrecadação do ICMS ecológico são os índices de conservação (IC) e fator qualidade (FQ). Para verificar se esse tributo está cumprindo seu objetivo, este trabalho, a partir de análise de uso e ocupação do solo pela base de dados do MapBiomas, mapas construídos no QGis e Google Earth Engine, dados de queimadas e os índices agregados a cada uma das unidades, buscou estudar a eficácia deste pagamento como estímulo para contínuos investimentos em conservação das unidades tendo em vista as inúmeras consequências positivas para a sociedade e o meio que estão inseridas. Foi observado que a partir do critério Meio Ambiente, o subcritério IC é extremamente significativo para os municípios estudados neste trabalho, sendo responsável por 89,4% do montante total arrecadado. Esse resultado reforçou a importância desse instrumento para os municípios que possuem UCs em seus territórios, e atesta que existem verbas no poder municipal que podem, e deveriam, de acordo com o objetivo principal do ICMS Ecológico, ser investidas em ações de proteção e conservação dessas Unidades de Conservação. De acordo com os resultados obtidos, foi possível identificar que os municípios recebem o repasse, mas não garantia de repasse desse tributo para as UCs, com isso, é necessário discutir a legislação dentro desse tributo para que o patrimônio seja utilizado para o seu objetivo que é o incentivo à preservação ambiental.

Introdução

O ICMS Ecológico, criado em 1991 no estado do Paraná, inicialmente tratado como um pagamento por serviços ambientais, já era previsto pela constituição de 1988 no artigo 158, e evoluiu para uma ferramenta de incentivo à conservação ambiental (LOUREIRO, 2013). Assim dizendo, não é uma nova forma de tributação, mas sim uma nova configuração de repasse aos municípios devido a reivindicação dos municípios sobre as restrições do uso do solo, com isso, viu-se necessário reformular os critérios de distribuição de ICMS (FERNANDES et al., 2011).

Em Minas Gerais, ele teve sua criação no ano de 1995 por meio da Lei Complementar Estadual n. 12040/95, mais conhecida por Lei Robin Hood. O modelo mineiro possui algumas particularidades como incluir critérios como patrimônio cultural, educação, produção de alimentos, número de habitantes por município, 50 municípios mais populosos, receita própria municipal, saúde e área geográfica (MINAS GERAIS, 1995). A Lei Estadual nº18030/2009 discorre os critérios de divisão do ICMS Ecológico e os métodos de cálculo, realizados em função do Índice de Meio Ambiente (IMA). O IMA é composto por três critérios de repartição do ICMS aos municípios mineiros divididos em três subcritérios. O primeiro refere-se ao Índice de Conservação, o sistema engloba áreas públicas ou privadas das três esferas de governo, que são cadastradas junto à Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, após a avaliação técnica do Instituto Estadual de Florestas (IEF). O segundo subcritério refere-se ao Índice de Mata Seca, que também é aferido pelo IEF e leva em consideração os dados de cobertura vegetal e reflorestamento de Minas Gerais e os desmatamentos detectados. O terceiro subcritério refere-se ao Índice de Saneamento Ambiental, auferido pela SEMAD, a Resolução SEMAD nº 1.273/2011 estabelece os critérios e procedimentos para o cálculo do fator de qualidade de empreendimentos de tratamento e/ou disposição final de resíduos sólidos urbanos e de tratamento de esgotos sanitários a serem aplicados na distribuição.

O IC considera em seu cálculo tanto o Fator de Qualidade (FQ) quanto o Fator de Conservação (FC). O FQ é contabilizado anualmente pelo IEF, e cada categoria de manejo possui uma pontuação máxima que influenciará diretamente no FQ. Já o FC, como descrito na Resolução SEMAD 318/2005, é utilizado para indicar o grau de restrição ao uso alternativo do solo nas UCs, variando dependendo de sua categoria e está regulamentado pela Resolução SEMAD 318 de 2005 e Resolução SEMAD nº 1245 de 2010, e possui como objetivo compensar os municípios que possuem áreas protegidas em seu território e incentivar a criação e implantação de UC's, além de melhorar a qualidade de gestão dessas áreas (SEMAD,2023).

Em 2024, 43,38% dos municípios mineiros receberam repasse financeiro pelo subcritério IC, somando 82,1 milhões de reais. (FJP, 2024). Apesar dos expressivos montantes financeiros envolvidos e dependência, os municípios possuem autonomia para investirem os valores arrecadados nas UC.

Fernandes et al. (2011) analisaram o ICMS Ecológico referente às UC em Minas Gerais e concluíram que houve aumento da renda dos municípios pouco produtivos e melhoria na conservação de UC já existentes, além de incentivo à criação de novas áreas. Por outro lado, Amda (2017) avaliou a destinação do ICMS Ecológico em 12 municípios mineiros que recebem

recursos pela existência de Unidades de Conservação (UC) e observou que, para a maioria, o ICMS Ecológico tem baixo estímulo à conservação ambiental no estado. Levando em consideração o relevante papel do referido instrumento político-econômico e que houve alterações recentes na avaliação do subcritério IC e no repasse do ICMS aos estados (Lei Complementar nº190/2022), torna-se importante avaliar as mudanças ocorridas no repasse do ICMS pelo subcritério IC para o estado de Minas Gerais.

Em suma, observando o cenário atual de repasse do ICMS ecológico no estado de Minas Gerais, a partir do subcritério Índice de Conservação, faz-se necessário analisar a eficácia desse estímulo financeiro para os municípios na preservação ambiental. Assim, o presente estudo objetivou avaliar o ICMS Ecológico e suas implicações para os municípios mineiros que possuem Unidades de Conservação em seu território.

Materiais e Métodos

Área de estudo

Utilizou-se como ponto inicial os municípios com maior repasse de ICMS Ecológico pelo subcritério Índice de Conservação (IC). Para isso, foram consultados os dados da Fundação João Pinheiro (FJP) e da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), referentes ao período de 2012 a 2022. Portanto, foram considerados no estudo os municípios que apareceram no ranking anual do relatório da FJP com os maiores valores de repasse referente ao subcritério IC e com maior frequência. Além disso, o banco de dados da FJP foi utilizado para examinar a arrecadação de cada município de forma temporal, no intuito de entender sua relação com as tabelas dos fatores de qualidade publicadas. Sendo assim, os municípios selecionados foram: Marliéria, São João das Missões, Timóteo, Catas Altas, São Gonçalo do Rio Preto, Araponga, Serranópolis, São João Batista do Glória, São Roque de Minas, Buenópolis, Ouro Branco e Matias Cardoso. Por conseguinte, as suas unidades de conservação desses municípios foram selecionadas para realizar o estudo.

Conservação das UCs e ICMS Ecológico

Para analisar a conservação das unidades de conservação durante os 10 anos, foram considerados três pontos: a área das UCs, o Fator de Qualidade (FQ) e o Índice de Conservação (IC). O intuito é comparar esses tópicos para cada unidade com a arrecadação anual e, assim, discutir se o repasse está sendo investido em medidas de proteção, conservação e no funcionamento das UCs.

No que diz respeito à área das UCs, observou-se as mudanças e a ocupação do solo. Para isso, foram utilizados os dados do Map Biomas (2023). Para o presente estudo foi selecionado dentro do software o recorte fundiário para encontrar o nome de cada unidade de conservação. Assim, foi possível extrair os dados de área das seguintes classes dos usos do solo: floresta, formação natural não florestal, agropecuária, área não vegetada e corpo d'água.

Dentro da análise de ocupação do solo foi avaliado a ocorrência de incêndios tanto nas UCs quanto nos municípios que as abrigam. Para isso, utilizou o histórico de cicatriz do fogo no Brasil, presente no Map Biomas. O intuito foi observar se as UCs servem como barreiras das queimadas e se possuem programas e brigadas de incêndio eficazes para prevenção e combate.

Dentro da análise de ocupação do solo, foi observado o impacto do setor minerário no caso de o município ser dependente desse setor econômico e impactar a conservação das UCs. Para isso, foram utilizados os dados de processos minerários disponíveis na Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-SISEMA), relacionado a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD, 2024).

Dos 853 municípios de Minas Gerais, a Fundação João Pinheiro relatou que 689 receberam repasse de valores do ICMS referente ao critério "Meio Ambiente" entre 2012 e 2022, sendo que 356 municípios se restringem ao subcritério "Índice de Conservação". Portanto, 41,7% de todas as cidades de Minas Gerais estão incluídas no repasse do ICMS Ecológico, subcritério IC.

Considerando como objeto de estudo os 12 municípios mais relevantes dentro do critério arrecadação, há 27 unidades conservação. No entanto, foi realizada uma análise mais profunda de 15 unidades de conservação e de seus reflexos econômicos, sociais e ambientais dentro de cada município. A escolha das UCs se baseou na ausência ou não de dados sobre a ocupação do solo, disponibilizadas pelo Map Biomas. Buscou-se relacionar o comportamento do FQ, da ocupação do solo das UC e as características socioambientais de cada município com os repasses do ICMS Ecológico (subcritério IC), para cada cidade.

Parâmetros FQ e IC

Inicialmente, foi realizado o levantamento dos nomes e das categorias das unidades de conservação presentes em cada município. Tal diferenciação é importante porque dentro da metodologia de cálculo do Índice de Conservação está presente o IC, relativo à categoria de manejo da UC e que tem um valor fixo para cada UC, podendo variar de 0,025 a 1. Em relação ao FQ, através das publicações disponibilizadas pela SEMAD, foi possível trazer os dados desse fator para cada UC referente aos anos de 2012 a 2022, para posterior comparação e análise. Portanto, foi possível listar os valores obtidos anualmente e analisá-los com o comportamento do solo das UCs e com as demais variáveis presentes dentro da metodologia de cálculo.

Geoprocessamento e códigos de computação

Com o objetivo de otimizar o tratamento dos dados e obter melhor análise das mudanças na vegetação, optou-se por utilizar o Google Earth Engine e o RStudio, em conjunto. A partir do Google Earth Engine, foram extraídos dados diretamente da "Coleção 8 – publicada em agosto de 2022" do Map Biomas, com destaque para o comportamento das florestas. Em paralelo, utilizou-se o código em linguagem C criado para investigar a floresta secundária do Brasil, com o foco na idade, extensão, incremento e perda de florestas. O código utilizado foi criado por Silva Júnior et al. (2020) que desenvolveram um conjunto de dados de resolução espacial das florestas secundárias brasileiras. Neste estudo, restringiu-se o uso da variável "extensão" de

florestas secundárias. Através da linguagem de computador e do software RStudio, foi possível restringir o banco de imagens para os anos de interesse do estudo e tratar as imagens. As imagens obtidas foram trabalhadas no QGis para a execução do geoprocessamento.

Questionário em formulário aplicado aos gestores

Tendo em vista a Deliberação Normativa da COPAM, nº 234, de 24 de julho de 2019, foram observados os parâmetros para a avaliação dos fatores de qualidade e conservação das UC's que são preenchidos pelos gestores. Dito isso, com o objetivo de observar uma concordância ou não desses dados, optou-se pela criação de um formulário autoral no Google Forms e enviado aos gestores por e-mail. Dentre os tópicos levantados dentro da pesquisa está a prevenção a incêndios florestais, infraestrutura e equipamentos, programas de educação e pesquisa e a importância do repasse do ICMS Ecológico para a UC. O formulário é sucinto e as respostas, em sua maioria, são de múltipla escolha para facilitar a compilação dos dados. Para que houvesse uma análise mais completa da situação das UCs, as perguntas destinadas aos gestores são de cunho quantitativo e qualitativo. Evidencia-se o uso de informações disponibilizadas pelos profissionais do IEF/SEMAD, por meio de e-mails e encontros virtuais.

Resultados e Discussão

A análise do uso do solo e das queimadas compreendeu uma série de municípios e suas respectivas unidades de conservação.

Os resultados das Unidades de Conservação analisadas evidenciam comportamentos distintos quanto à efetividade da conservação ambiental. O Parque Estadual do Rio Doce (Marliéria/Timóteo) apresentou manutenção e leve aumento da cobertura florestal, atuando como importante barreira ao desmatamento, embora com redução recente do Fator de Qualidade (FQ) e baixa aplicação direta dos recursos recebidos. Já o Parque Nacional Cavernas do Peruaçu (São João das Missões) registrou perda significativa de áreas florestais e avanço da agropecuária, além de queda acentuada do FQ, indicando fragilidades na gestão.

O Parque Estadual do Rio Preto (São Gonçalo do Rio Preto) demonstrou relativa estabilidade ambiental, com pequenas variações no uso do solo, embora com ocorrência relevante de queimadas e ausência de apoio financeiro direto do município. O Parque Estadual Serra do Brigadeiro (Araponga) apresentou resultados positivos, com aumento de áreas florestais e redução da agricultura, indicando efetividade das ações de conservação.

Por sua vez, o Parque Serra Nova e Talhado (Serranópolis de Minas) apresentou redução de cobertura florestal e aumento de áreas agropecuárias, evidenciando pressões antrópicas. Já o Parque Estadual Serra do Rola-Moça (RMBH) — considerado como substituição – representa uma UC relevante na região metropolitana, sujeita a pressões urbanas, mas com papel importante na proteção de mananciais e remanescentes de vegetação nativa.

De forma geral, embora as UCs exerçam papel fundamental na conservação ambiental, observa-se heterogeneidade nos resultados e fragilidades na gestão. Além disso, apesar da relevância do ICMS Ecológico como fonte de recursos, há indícios de baixa aplicação direta nas unidades, o que compromete sua efetividade como instrumento de incentivo à preservação.

Em Catas Altas, a Área de Proteção Ambiental (APA) Sul – RMBH foi avaliada. Nela, a área de floresta diminuiu cerca de 610 ha (cerca de 0,8%). Isso foi seguido pela diminuição de área de formação natural não florestal (40 ha), agropecuária (1592 ha) e de corpo d'água (30 ha). Por outro lado, a classe área não vegetada teve um aumento territorial expressivo de 2273 ha, que pode ser área urbanizada, mineração ou outro tipo de área não vegetada. Além disso, houve maior quantidade de florestas secundárias em 2022, se comparado com o ano de 2012 e 2015. O aumento considerável de área não vegetada pode ser associado ao avanço da extração mineral. Por meio do IDE-SISEMA, foi observado que dentro da APA Sul-RMBH há diversos processos minerários ativos.

O aumento de florestas secundárias pode ser considerado positivo e relacionado ao ganho de florestas naturais, influenciado por medidas de preservação e conservação. E, por outro lado, evidencia que houve supressão de vegetação nos anos anteriores. As áreas com florestas foram menos atingidas por queimadas, podendo indicar boas ações de combate e prevenção de incêndios realizados pela gestão da APA. Ao comparar os dados de área queimada anual da UC e da cidade de Catas Altas, é identificado mais áreas queimadas dentro da UC, que tem presenciado uma fragilidade por ações externas.

A Figura 1 explicita a análise de uso e ocupação do solo da APA Sul, evidenciando suas diferenças entre 2012 e 2022. Já a Figura 2 apresenta a evolução das florestas secundárias, em 2012, 2015 e 2022. Complementarmente, a Figura 3 mostra a mancha acumulada das áreas de queimadas na APA Sul. Um processo similar foi realizado para as outras unidades de conservação.

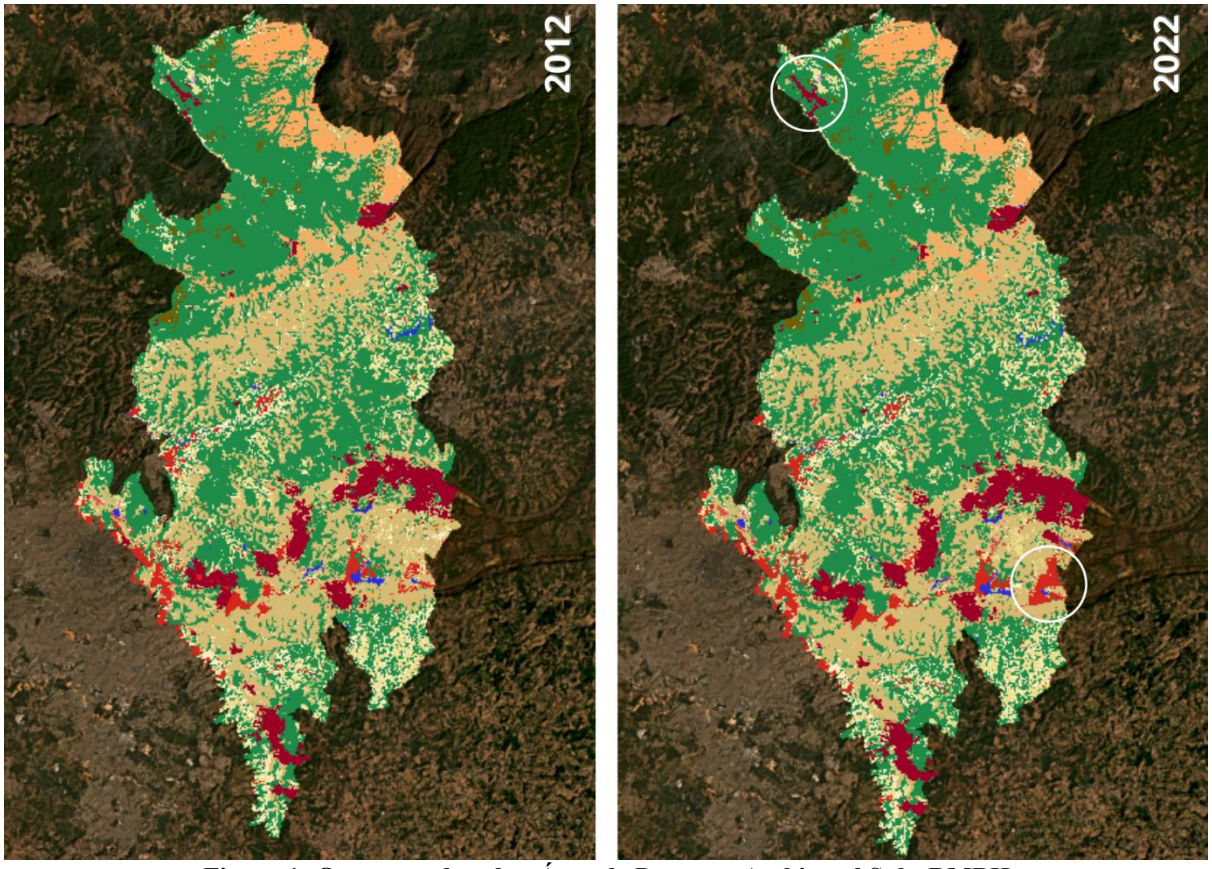


Figura 1: Ocupação do solo - Área de Proteção Ambiental Sul - RMBH
Fonte: Map Biomas (2023).

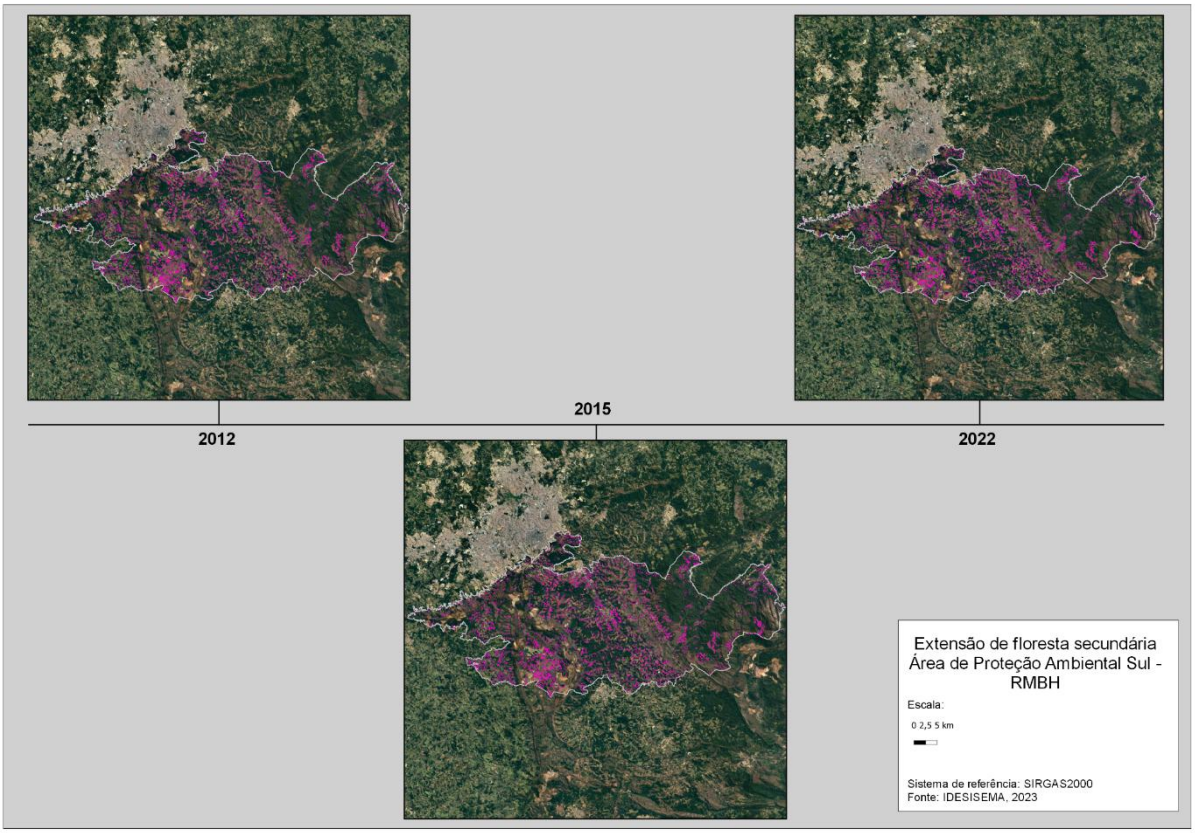


Figura 2: Comportamento das florestas secundárias - APA SUL
Fonte: Autoral (2023).

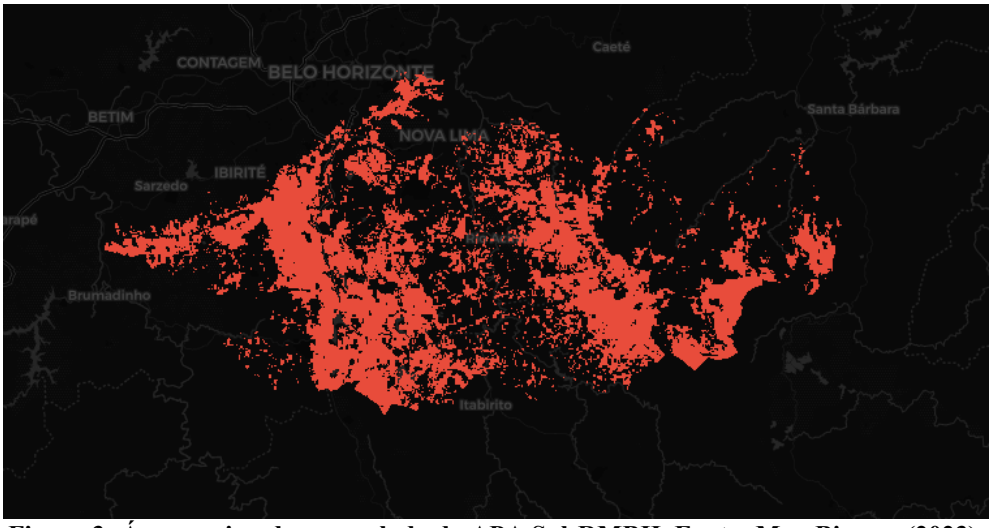


Figura 3: Área queimada acumulada da APA Sul-RMBH. Fonte: Map Biomas (2023).

Além da verificação da conservação do solo e análise das queimadas em cada município, o questionário formulado pelos autores foi aplicado e respondido por algumas das gerências das UCs supracitadas. Os resultados relativos ao município de Catas Altas estão apresentados a seguir:

Em Catas Altas, na APA Sul – RMBH: os pontos positivos relatados no formulário foram a existência de um Programa de Gestão que visa a manutenção e conservação e um Plano de Prevenção e Combate a Incêndios Florestais. Um tópico importante foi o relato de áreas em processo de recuperação com o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), podendo ser uma explicação para o aumento das florestas secundárias. Por outro lado, as respostas do formulário indicaram a inexistência de Plano de Manejo, Programa de Educação Ambiental e de Pesquisa Científica, fatos que podem explicar o baixo FQ da UC. Sobre a infraestrutura e equipamentos, pouco foi citado e, os funcionários e gerente da APA utilizam uma sala cedida pelo Parque Estadual Serra do Rola Moça para trabalharem. Destaca-se que por ser uma área sensível à mineração, a existência de um Plano de Manejo é urgente para definição de normas sobre o tipo de uso do solo da UC. Ademais, foi exposto o não apoio voluntário do município para a UC, seja por repasse financeiro ou com cessão ou empréstimo de pessoal, equipamentos, materiais e/ou espaço. Portanto, a gerência da APA SUL indicou como zero a importância do ICMS ecológico para a UC, considerando que nenhum dos 13 municípios apoiam a UC. Tal relato é insatisfatório e indica deficiências da gestão municipal com a APA Sul - RMBH.

As respostas obtidas por meio do formulário evidenciaram que o impacto final do repasse não tem cumprido com efetividade o seu objetivo de manutenção e conservação das UCs. Dentre as nove UCs que responderam o formulário, quatro não consideram o instrumento importante (uma vez que não houve repasse), duas deram pouca importância, uma considerou o ICMS Ecológico importante e somente três UCs reconheceram-o como extremamente importante. Logo, as respostas obtidas levantam a ocorrência de fragilidades e ineficiências na eficácia do ICMS Ecológico. É necessário destacar que os municípios estão sim recebendo o repasse referente ao subcritério IC, sugerindo má gestão pública no repasse financeiro das prefeituras para as UCs, falta de diálogo com as gerências da UCs e falta de transparência acerca do repasse do ICMS Ecológico na maioria das cidades.

A Figura 04 apresenta uma análise detalhada do comportamento e a relação entre ICMS total, ICMS ecológico, o subcritério IC e o FQ associados na APA Sul

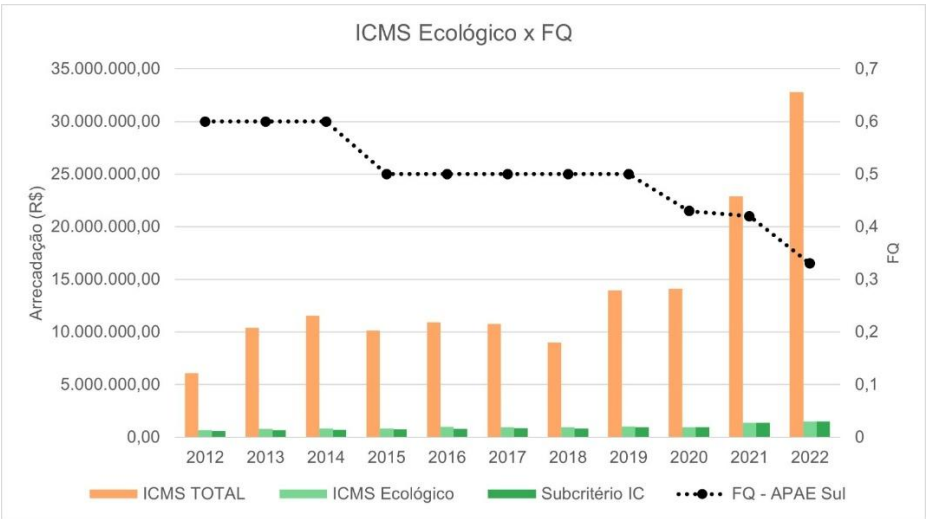


Figura 4: Panorama do ICMS Ecológico em Catas Altas. Fonte: Fundação João Pinheiro (2023).

Considerações Finais

Diante disso, a análise detalhada dos 12 municípios e das 15 unidades de conservação estudadas permitiu várias considerações sobre o impacto do ICMS Ecológico. O IC é um importante elemento e tem como principal objetivo compensar os municípios que possuem áreas protegidas no seu território, incentivar a criação e implementação de UCs, e sobretudo, melhorar a qualidade da gestão dessas áreas. Foi possível demonstrar que o subcritério IC representa cerca de 90% do ICMS Ecológico arrecadado, destacando sua importância econômica e ambiental para os municípios estudados.

Em relação ao FQ, as mudanças implementadas pela Deliberação Normativa COPAM nº 234 explicam a diminuição das pontuações dos FQs a partir de 2019. A metodologia de cálculo tornou-se mais exigente, incorporando novos parâmetros de avaliação de conservação e proteção das UCs. No entanto, foi observada a falha nos critérios de avaliação do uso do solo das UCs, já que as mudanças na cobertura florestal não têm sido refletidas no FQ, indicando a necessidade de melhorias no parâmetro sobre a cobertura anual da UC. A dificuldade de executar mapas conforme o parâmetro e de cumprir a entrega de todas as documentações exigidas, também aparecem como empecilhos para a eficácia do instrumento.

Além disso, as entrevistas com os gerentes de 9 das 15 UCs analisadas revelaram perspectivas variadas sobre o apoio financeiro voluntário dos municípios, sendo os "outros tipos de apoio" (como cessão de pessoal e equipamentos) mais frequentes que os financeiros. A percepção da importância do ICMS Ecológico também varia, mas só três o reconhecem como extremamente importante. As respostas indicam fragilidades na eficácia do ICMS Ecológico.

A partir das análises feitas em torno das UCs escolhidas, considerando arrecadação anual, o uso e cobertura do solo, queimadas, área total, fatores de conservação e qualidade e o formulário aplicado aos gestores, foi observado que o ICMS Ecológico ainda possui desafios a serem superados para que ele possa cumprir seu principal objetivo que é servir de incentivo à preservação ambiental. Nesse aspecto, é importante ressaltar que a lei não obriga o município que recebe essa compensação, que esse mesmo estímulo seja reinvestido na área que o proveu, ou seja, perde o propósito desse imposto, já que como foi visto, muitas UCs não recebem de volta do município o capital que ela gera pela área conservada, tornando isso um problema de debilidade das normas e regulamentações do estado. Assim, afirma-se ser necessário medidas de inserção de critérios na metodologia de cálculo do FQ que incentivem maior transparência nos repasses e garantam um investimento mínimo anual para as UCs.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Centro de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) pelo apoio recebido, com bolsa PIBIC – DPPG 182/2022.

Referências

AMDA – ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE DEFESA DO AMBIENTE. **ICMS Ecológico em Minas Gerais é baixo estímulo à conservação da biodiversidade e da água**. 2017. Disponível em: < https://www.amda.org.br/index.php/comunicacao/informacoes-ambientais/5226-icms-ecologico-em-minas-gerais-e-baixo-estimulo-a-conservacao-da-biodiversidade-e-da-agua>. Acesso em: 18 mar. 2026.

BRASIL. **Lei n° 9.985, de 18 de julho de 2000**. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências.

FERNANDES, L. L., COELHO, A. B., FERNANDES, E. A., & LIMA, J. E. D. **Compensação e incentivo à proteção ambiental: o caso do ICMS ecológico em Minas Gerais**. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 49, p. 521-544, 2011.

FJP – FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **ICMS – Lei Robin Hood**. 2024. Disponível em: < http://robin-hood-historico.fjp.mg.gov.br/index.php/transferencias/index.php?option=com_jumi&fileid=15 />. Acesso em: 02 mar. 2025.

MAP BIOMAS. **Plataforma Map Biomas cobertura e uso**. 2023. Disponível em: https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/. Acesso em: 18 de set. de 2023.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa da COPAM, nº234, de 24 de julho de 2019**. Conselho Estadual de Política Ambiental. Belo Horizonte, 2019.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa da COPAM, nº86, de 17 de junho de 2005**. Conselho Estadual de Política Ambiental. Belo Horizonte, 2005.

MINAS GERAIS. **Lei no 18.030, de 12 de janeiro de 2009**. Dispõe sobre a distribuição da parcela da receita do produto da Arrecadação do ICMS pertencente aos municípios.

MINAS GERAIS. **Lei No 18.030, de 12 de janeiro de 2009**. Dispõe sobre a distribuição da parcela da receita do produto da Arrecadação do ICMS pertencente aos municípios.

MME – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Painel das Unidades de Conservação Brasileiras**. 2024. Disponível em: "https://cnuc.mma.gov.br/powerbi". Acesso em: 20 de jan. 2024.

SEMAD – SECRETARIA DO ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (SISEMA).** Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. 2024.

SILVA JUNIOR, C.H.L.; HEINRICH, V.H.A.; FREIRE, A.T.G.; BROGGIO, I.S.; ROSAN, T.M.; DOBLAS, J.; ANDERSON, L.O.; ROUSSEAU, G.X.; SHIMABUKURO, Y.E.; SILVA, C.A.; HOUSE, J.I.; ARAGÃO, L.E.O.C. **Benchmark maps of 33 years of secondary forest age for Brazil**. Scientific Data, Vol. 7, No. 269, 2020. https://doi.org/10.1038/s41597-020-00600-4.

NOVA LEI GERAL DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL E SEUS IMPACTOS PARA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO NO RIO GRANDE DO SUL

1 Diego Polacchini Carrillo, 2 Cristiano Poleto

1 Fundação Estadual de Proteção Ambiental - FEPAM, e-mail: diego-carrillo@fepam.rs.gov.br; 2 Instituto de Pesquisas Hidráulicas Universidade Federal do Rio Grande do Sul – IPH/UFRGS, e-mail: cristiano.poleto@ufrgs.br

Palavras-chave: sistemas de esgotamento sanitário; licenciamento ambiental; outorga de lançamento.

Resumo

A deficiência na coleta e no tratamento de esgoto compromete progressivamente a qualidade e a disponibilidade da água. A garantia de acesso ao saneamento para todos até 2030 compõe um dos dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (NAÇÕES UNIDAS, 2015). No Brasil, através da a Lei Federal nº 14.026 (2020) foi firmada a meta de na próxima década ser atingido o ambicioso índice de 90% de atendimento da população com coleta e tratamento de esgoto (meta de universalização). Diagnósticos do setor indicam que um dos óbices para a implantação de sistemas de esgotamento sanitário seria a rigidez normativa relacionada ao licenciamento ambiental, tanto que em fevereiro de 2026 passou a vigorar a Lei Geral do Licenciamento Ambiental (Lei Federal nº 15.190/2025) que desobriga do licenciamento ambiental a implantação de sistemas de esgotamento sanitário, sendo exigível apenas a outorga de lançamento em corpos hídricos enquanto não forem atingidas as metas de universalização. A licença ambiental é um dos instrumentos da política de meio ambiente, cuja doutrina está associada a preservação da qualidade ambiental, enquanto a outorga é um dos instrumentos da política de recursos hídricos cuja doutrina está associada a lógica de utilização equilibrada do recurso, isto é a disponibilidade hídrica pode ser integralmente distribuída entre os usuários, incluindo a manutenção do ecossistema equilibrado. No estado do Rio Grande do Sul, a lei que instituiu a política estadual de recursos hídricos (Lei nº 10.350/1994) atribuiu ao órgão gestor de recursos hídricos (Departamento de Recursos Hídricos) a emissão de outorga para usos que alterem as condições quantitativas das águas e ao órgão ambiental do Estado a emissão de outorga quando referida a usos que afetem as condições qualitativas das águas. Enquanto o órgão gestor de recursos hídricos estruturou seu sistema de outorga, o órgão ambiental compreendeu que a autorização para o lançamento de efluentes poderia ser dado dentro do licenciamento ambiental. Assim, enquanto o órgão gestor de recursos hídricos emite outorga, considerando uma doutrina utilitarista, o órgão ambiental emite autorizações de lançamento de efluentes, considerando uma doutrina de preservação ambiental. Além da diferença de conceitual de análise para demanda de uso dos recursos hídricos, os dois sistemas (do órgão gestor de recursos hídricos e do órgão ambiental) não estão integrados entre si, isto é a análise da disponibilidade hídrica não considera a demanda para diluição de efluentes já autorizada. O estado possui projeto de implementação de sistema de outorga para lançamento de efluentes com cronograma de implantação até o ano de 2030. Considerando a necessidade de emissão de outorga de lançamento de forma urgente, imposta pela Lei Geral do Licenciamento Ambiental, este trabalho proporá procedimentos a serem implementados para emissão de outorga de lançamento de efluentes líquidos tratados de Sistemas de Esgotamento Sanitário pelo órgão ambiental do Estado de forma temporária, até o sistema de outorga de lançamento ser efetivado pelo órgão gestor de recursos hídricos.

Introdução

A deficiência na coleta e no tratamento de esgoto compromete progressivamente a qualidade e a disponibilidade da água, desestabiliza os ecossistemas, eleva os custos do tratamento para abastecimento público, intensifica a incidência de doenças de veiculação hídrica e aumenta os gastos com saúde pública (CASTRO e BROCH, 2025).

Em diagnóstico elaborado pela Agência Nacional de Águas (Atlas de esgotos, ANA 2025) para o ano de 2023 há a estimativa de que aproximadamente 67% da população do sul do país utiliza serviços de esgotamento sanitário geridos de forma segura, enquanto que no Plano Estadual de Saneamento (SEMA, 2022), do Rio Grande do Sul, a estimativa é de que apenas 26% do estado teria cobertura adequada de coleta e tratamento de esgoto. Esta estimativa teve como fonte o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, ano-base 2020. Em que pese a diferença dos resultados dos indicadores de atendimento de serviço de saneamento, é evidente que existe grande déficit a ser superado a médio prazo.

Diagnósticos do setor indicam que um dos óbices para a implantação de sistemas de esgotamento sanitário está associado a rigidez normativa relacionada ao licenciamento ambiental, muito embora este tipo de serviço esteja relacionado com várias políticas públicas, tais como: política de saneamento, política de meio ambiente, política de recursos hídricos, política de ordenamento do solo etc.

Procedimentos e critérios gerais para o licenciamento ambiental foram estabelecidos na Resolução CONAMA nº 237/1997, em que "*interceptores, emissários, estação elevatória e tratamento de esgoto sanitário*" são considerados serviços de utilidade sujeito ao licenciamento ambiental, cabendo ao órgão ambiental competente definir critérios de exigibilidade, levando em consideração as especificidades, os riscos ambientais, o porte e outras características do empreendimento ou atividade.

Em 2006 o CONAMA dispôs procedimentos simplificados para licenciamento ambiental de Sistemas de Esgotamento Sanitários (CONAMA nº 377/2006) de pequeno e médio porte, desde que não localizados em áreas ambientalmente sensíveis, e

em 2011 foram consolidados critérios diferenciados para lançamento de efluentes de sistemas sanitários, em relação a efluentes industriais, na Resolução CONAMA nº 430/2011.

A possibilidade de simplificação de procedimentos de licenciamento ambiental e de diferenciação de critérios de lançamento de efluentes não foram considerados suficientes para viabilizar a aceleração da implementação de Sistemas de Esgotamento Sanitário, de forma que fosse possível atingir as metas de universalização previstas no novo marco do saneamento básico (Lei Federal nº 14.026/2020).

Afim de propiciar investimentos em saneamento básico com recursos do setor privado, o poder público, tanto federal quanto estadual, têm atuado em várias frentes para organizar e simplificar os marcos regulatórios.

Em maio de 2025 foi aprovada a Lei Geral do Licenciamento Ambiental (LGLA, Lei nº 15.190/2025), que vinha sendo discutida no Congresso desde 2004. Esta lei traz normas gerais e diretrizes sobre o licenciamento, com a intenção de uniformizar os procedimentos para emissão de licença ambiental em todo o país e simplificar a concessão de licenças para os empreendimentos de menor impacto. Esta lei entrou plenamente em vigor em fevereiro de 2026.

Segundo esta lei, empreendimentos de esgotamento sanitário são dispensados de licença ambiental (instrumento da política de meio ambiente), até o atingimento das metas de universalização (previsto na política de saneamento) sendo exigível outorga de lançamento (instrumento de política de recursos hídricos).

Em nível federal a outorga de lançamento de efluentes está implementada pela Agência Nacional de Águas, enquanto no estado do Rio Grande do Sul, por conta da organização proposta na sua política de recursos hídricos (Lei nº 10.350/1994), em que aspectos quantitativos são de responsabilidade do órgão gestor (DRH) e aspectos qualitativos são de responsabilidade do órgão ambiental (FEPAM), a avaliação de lançamento de efluentes é feita dentro do licenciamento ambiental, inexistindo o instrumento de outorga de lançamento da forma idealizada pela legislação nacional.

Em 2021 foi criado Grupo de Trabalho (GT) composto por representantes da Secretaria Estadual do Meio Ambiente que teve como objetivo conceber e propor plano de implantação da outorga de lançamento de efluentes conforme previsto na política estadual de recursos hídricos. Em dezembro de 2024 foi finalizado relatório em que a implementação do sistema de outorga de efluentes seria implantado por fases, com conclusão em cinco anos (até 2030).

Desta forma, torna-se necessário o Estado adequar seus instrumentos de gestão, implementando o instrumento de outorga de lançamento de efluentes para sistemas de esgotamento sanitário de forma temporária, até a implementação do sistema de outorga definitivo previsto para 2030. Este sistema temporário de outorga de lançamento deverá considerar, dentre outras questões, aspectos institucionais e de demanda de outorga de lançamento para SES.

Este trabalho visa avaliar os impactos da Lei Geral de Licenciamento Ambiental na implantação de Sistemas de Esgotamento Sanitário no Rio Grande do Sul, tendo como base a identificação de aspectos institucionais de outorga, a identificação de demanda de outorga de lançamento de efluentes de SES e propor condições e restrições para estas outorgas de modo mitigar eventuais impactos ambientais negativos.

Material e Métodos

Do licenciamento ambiental

A política nacional de meio ambiente tem como primeiro objetivo a compatibilização do desenvolvimento econômico social com a preservação da qualidade do meio ambiente e do equilíbrio ecológico, para tanto dispões como instrumentos, dentre outros, o estabelecimento de padrões de qualidade ambiental, a avaliação de impactos ambientais e o licenciamento de atividades efetiva e potencialmente poluidoras (BRASIL, Lei nº 6.938/1981). Integra o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), aonde são discutidos e estabelecidos diretrizes, normas e padrões de qualidade ambiental e licenciamento.

Os princípios da política estadual do meio ambiente do Rio Grande do Sul estão estabelecidas na Lei nº 15.434/2020, sendo que as diretrizes, normas e padrões de qualidade, são discutidas e publicadas pelo Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA).

Procedimentos e critérios gerais para o licenciamento ambiental foram estabelecidos na Resolução CONAMA nº 237/1997, em que “interceptores, emissários, estação elevatória e tratamento de esgoto sanitário” são considerados serviços de utilidade sujeito ao licenciamento ambiental, cabendo ao órgão ambiental competente definir critérios de exigibilidade, levando em consideração as especificidades, os riscos ambientais, o porte e outras características do empreendimento ou atividade.

Em 2006 o CONAMA dispôs procedimentos simplificados para licenciamento ambiental de Sistemas de Esgotamento Sanitários (CONAMA nº 377/2006) de pequeno e médio porte, desde que não localizados em áreas ambientalmente sensíveis.

Critérios de porte e potencial poluidor de atividades potencialmente poluidoras no estado do Rio Grande do Sul estão estabelecidos na Resolução CONSEMA nº 372/2018. Esta resolução passa por constante atualização, e em relação aos SES os parâmetros, que foram atualizados em 2023.

O padrão de qualidade ambiental a ser considerado para o licenciamento está estabelecido na Resolução CONAMA nº 357/2005, aonde estão estabelecidos padrões para diferentes classes de uso dos recursos hídricos (enquadramento).

Em 2011 foi complementado diretrizes nacionais para lançamento de efluentes na Resolução CONAMA nº 430/2011. Nesta resolução foram explicitados importantes conceitos úteis para o licenciamento ambiental, tais como: capacidade de suporte do corpo hídrico receptor e zona de mistura.

Enquanto na Resolução CONAMA nº 357/2005 são estabelecidos padrão de qualidade dos corpos receptores, na Resolução CONAMA nº 430/2011 são estabelecidos padrões de lançamento de efluentes nos corpos hídricos. Ambos os padrões

estão inter-relacionados. O real objetivo de ambos é a preservação da qualidade do corpo hídrico, no entanto os padrões de lançamento existem por uma questão prática, já que é difícil manter controle efetivo das fontes poluidoras com base na qualidade do corpo receptor (VON SPERLING, 2007).

Em nível estadual, em 2017 foi publicada a Resolução CONSEMA nº 355/2017 que dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. Esta resolução consistiu e adequou critérios que já estavam em utilização no estado (Resolução CONSEMA nº 128/2006, Portaria SSMA n° 5/89, notas técnicas da FEPAM, etc) inserindo os conceitos de capacidade de suporte do corpo receptor e zona de mistura.

De acordo com estas resoluções a viabilidade ambiental para o lançamento de efluentes depende do atendimento de uma inequação (Art 7º) que determina proporcionalidade entre a vazão do corpo hídrico receptor em relação à vazão de lançamento de efluentes. Na prática, quando a vazão do corpo hídrico receptor é aproximadamente 20 vezes maior que a vazão de lançamento, a viabilidade ambiental é constatada de forma muito célere, para outros casos é necessário apresentar estudos complementares. Estes estudos estão relacionados a estimativa da capacidade de depuração do corpo hídrico receptor e investigação de eventuais usos da água que poderão sofrer impacto pelo lançamento de efluente.

Da outorga de recursos hídricos

A política nacional de recursos hídricos tem como um dos seus objetivos a utilização racional e integrada dos recursos hídricos com vistas ao desenvolvimento sustentável, sendo a outorga um de seus instrumentos de gestão (BRASIL, Lei nº 9.433/1997). O estabelecimento de normas e padrões é feita pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH).

Segundo a política de recursos hídricos, a outorga de direitos de uso de recursos hídricos, é o ato administrativo mediante o qual a autoridade outorgante faculta ao outorgado o uso de recurso hídrico, por prazo determinado que tem como objetivo assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água. Está sujeito a outorga pelo Poder Público, dentre outros usos, o lançamento em corpo de água de esgotos e demais resíduos líquidos.

Procedimentos e critérios gerais para outorga dos recursos hídricos estão estabelecidos na Resolução CNRH nº 16/2001, sendo que a Resolução CNRH nº 140/2012, estabelece critérios gerais para outorga de lançamento de efluentes com fins de diluição em corpos de água superficiais.

Um dos principais critérios a serem observados para a viabilidade de concessão de outorga é a qualidade da água do corpo hídrico receptor e o padrão de qualidade que deve ser mantido de forma que possa ser mantido os usos da água desejados (enquadramento).

O enquadramento deve ser objeto de discussão pública dos usuários da bacia hidrográfica, tendo como base estudos técnicos (elaborados pela agência de recursos hídricos) tendo sido aprovado pelo comitê de bacia. Estes procedimentos estão estabelecidos na Resolução CNRH N 91/2008.

Os princípios e objetivos da política estadual do recursos hídricos do Rio Grande do Sul estão estabelecidas na Lei nº 10.350/1994, sendo que as diretrizes e normas são discutidas e publicadas pelo Conselho Estadual do Recursos Hídricos (CRH).

Está definido na política estadual de recursos hídricos que dependerá da outorga do uso da água qualquer empreendimento ou atividade que altere as condições quantitativas e qualitativas (Art 29), e que a outorga será emitida pelo Departamento de Recursos Hídricos mediante autorização ou licença de uso, quando referida a usos que alterem as condições quantitativas das águas, e que o órgão ambiental do Estado emitirá a outorga quando referida a usos que afetem as condições qualitativas das águas.

Critérios de outorga no Rio Grande do Sul estão regulamentados no Decreto nº 58.058/2025, em que é reforçado que o regime de outorga do direito de uso de recursos hídricos no Rio Grande do Sul, compete à Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura - SEMA, por meio do Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento - DRHS, na qualidade de Autoridade Outorgante, instituir e manter o regime de outorga de direito de uso de recursos hídricos (Art 4º), podendo a SEMA e a FEPAM, emitir atos administrativos conjuntos relacionados ao uso dos recursos hídricos e ao licenciamento ambiental no SIOUT RS, conforme regulamentação (Art 31). Neste caso FEPAM é a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Roessler, órgão responsável pelo licenciamento ambiental no estado, e SIOUT é o sistema de outorga baseado em Sistema de Informação Geográfica.

Tabela 1 - Síntese comparativa dos instrumentos de gestão – licença ambiental x outorga recursos hídricos

Instrumento	Política	Objetivo (um dos)
Licença ambiental	Meio Ambiente	compatibilização do desenvolvimento econômico social com a **preservação** da qualidade do meio ambiente
Outorga	Recursos Hídricos	**utilização** racional e integrada dos recursos hídricos com vistas ao desenvolvimento sustentável

Articulação entre licenciamento ambiental e outorga

A implantação de empreendimento potencialmente poluidores e utilizadores de água dependem tanto de licença ambiental quanto de outorga de uso dos recursos hídricos. Do ponto de vista administrativo o fluxo de procedimentos está definido na Resolução CNRH nº 65/2006.

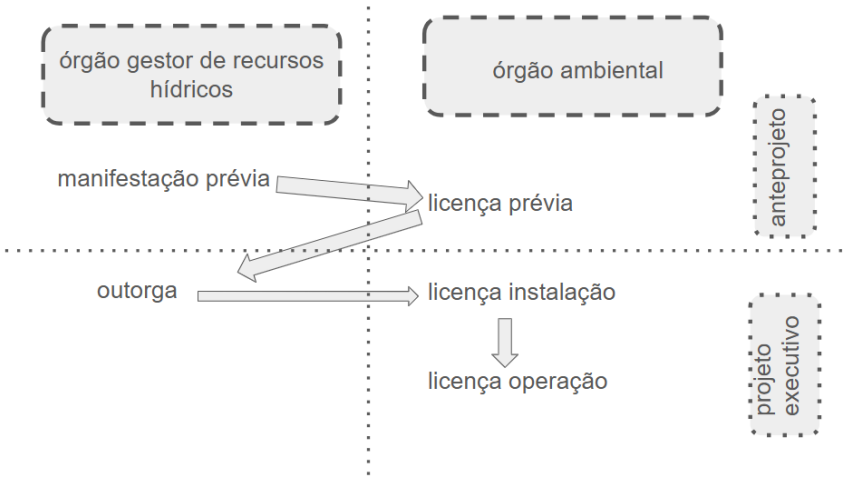


Figura 1 – Articulação dos procedimentos para obtenção de outorga e de licença ambiental (Res CNRH N 65/2006)

Resultados e Discussão

Com a nova Lei Geral do Licenciamento Ambiental (de maio de 2025), a autoridade ambiental competente deverá assegurar procedimentos simplificados e prioridade na análise para o licenciamento ambiental de projetos relacionados às atividades ou aos empreendimentos de abastecimento de água e esgotamento sanitário abrangidos pela Lei nº 11.445/2007 (Lei de Saneamento Básico), quando exigível, estando dispensados do licenciamento ambiental até o atingimento das metas de universalização previstas na Lei nº 11.445/2007, os sistemas e as estações de tratamento de água e de esgoto sanitário, exigível, neste último caso, outorga de direito de uso de recursos hídricos para o lançamento do efluente tratado (Art 10º § 2º).

Considerando que a previsão atual do Departamento de Recursos Hídricos (autoridade outorgante do Estado) é de implementar outorga de lançamento num prazo de cinco anos, e que a Lei Geral de Licenciamento ciou demanda de outorga de lançamento de efluentes para Sistemas de Esgoto Sanitário, propomos modelo simplificado de outorga, mais próximo de cadastro, que considera as características dos empreendimentos a serem autorizados.

Características dos sistemas de esgotamento sanitário do estado

No estado do Rio Grande do Sul a atividade de Sistemas de Esgotamento Sanitário (SES) é considerada de baixo potencial poluidor (Resolução CONSEMA Nº 372/2018,), cujo critério de porte é estabelecido em função da vazão afluente da ETE, em m3/dia, e o sistema pode ser composto por interceptores, coletores tronco, estações elevatórias, linhas de recalque, tratamento e/ou emissários.

Tabela 2 - Classificação de porte de SES segundo CONSEMA 372/2018.

Porte	mínimo	pequeno	médio	grande	excepcional
m3/d	4.000	8.000	24.000	40.000	> 40.000

Ao considerar produção de esgoto bruto média per capita (Quota Per Capita, QPC) em torno de 160 L/dia (VON SPERLING, 1997), é possível estimar a população a atendida por porte de SES.

Tabela 3 – Estimativa de população atendida por porte de SES.

Porte	mínimo	pequeno	médio	grande	excepcional
População equivalente	25.000	50.000	150.000	250.000	> 250.000

Estimativa de demanda de licença de SES no estado do Rio Grande do Sul

Em levantamento feito no banco de dados da FEPAM em março de 2026, foram identificados 252 municípios com pelo menos uma licença ambiental emitida de Sistema de Esgotamento Sanitário (Figura 2). Foram desconsideradas licenças emitidas pelo órgão licenciador federal (IBAMA) e por órgãos municipais, que não possuem atribuição de licenciamento de SES, independente do porte.

No Plano Estadual de Saneamento (PLANESAN, 2022) foi apresentado a projeção populacional para os 497 municípios do Rio Grande do Sul para o ano de 2041. Ao cruzar estas informações de projeção populacional por município, conseguimos estimar qual seria a demanda de licenças ambientais de SES por porte de empreendimento (Figura 3 e Tabela 4).

Comparando as informações de número de municípios que já possuem licença ambiental de SES, com a estimativa de número de municípios classificados por porte, podemos estimar a demanda para novos empreendimentos, classificados por porte.

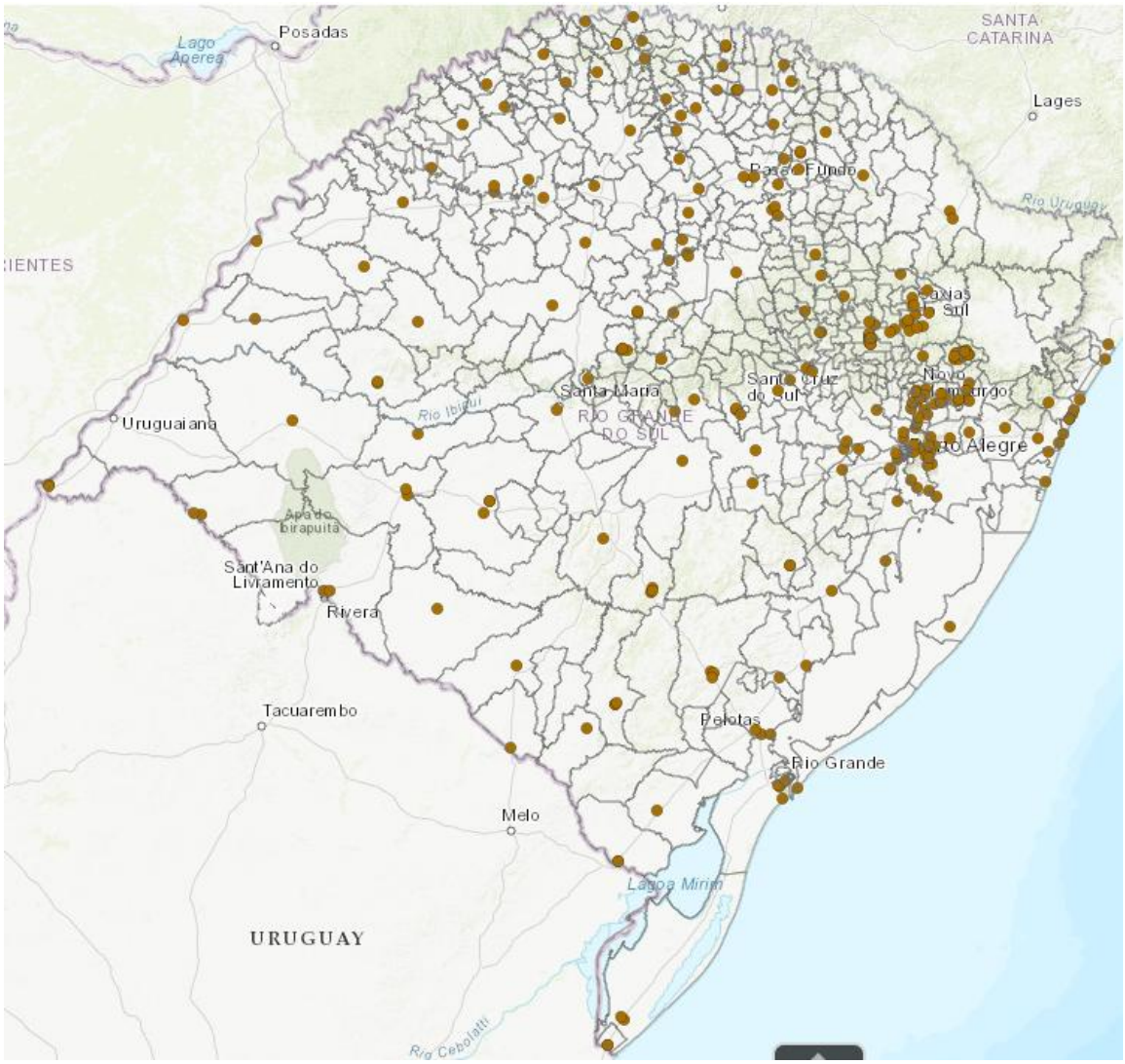


Figura 2 – Municípios com pelo menos uma licença ambiental de Sistemas de Esgotamento Sanitário em vigor no estado do Rio Grande do Sul em março de 2026. Fonte: SIGFEPAM em março de 2026.

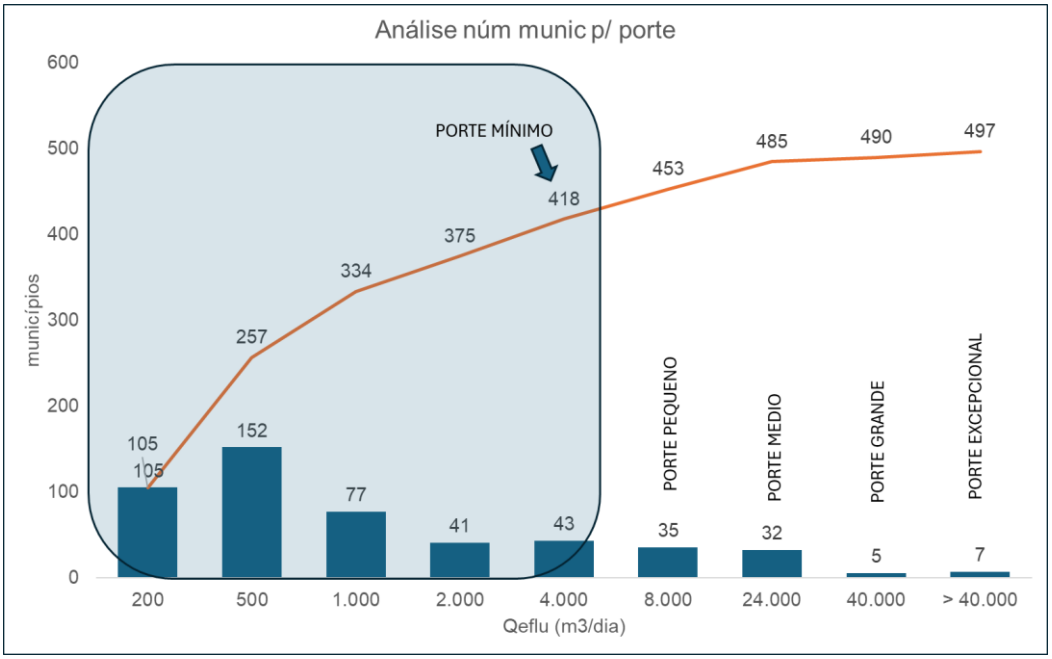


Figura 3 - Número de municípios do RS em relação à faixa de vazão de porte de SES (estimativa para demanda em 2041).

Tabela 4 – Estimativa de demanda de licenças, ou outorgas de SES.

Estimativa de número de municípios	Porte					Total
	mínimo	pequeno	médio	grande	excepcional	
Em função do porte de SES	418	35	32	5	7	497
Com pelo menos uma licença emitida	173	36	33	8	2	252
Demanda	245	-1 (*)	-1 (*)	-3 (*)	5	245

A ocorrência de demanda negativa decorre do fato de estarmos tratando de estimativa de projeção populacional para os municípios do RS, realizadas de forma equânime no planejamento estadual (PLANESAN, 2022), e de projeções de população realizadas de forma individual para cada empreendimento licenciado.

O importante desta estimativa é compreender, em termos de ordem de grandeza, que a maior demanda de licenciamento de SES está associada a municípios de até 25.000 habitantes. São aproximadamente 418 municípios com população inferior a 25.000 habitantes, que poderiam ser atendidos por SES de porte mínimo, com vazão de lançamento inferior a 4.000 m3/dia. Destes 418 municípios, pelo menos 173 já possuem pelo menos uma licença ambiental de SES emitida, indicando uma demanda de aproximadamente 245 municípios que necessitariam implantar, ou regularizar SES.

Proposta de critérios para outorga

Considerando que a maior demanda de outorga é de Sistemas de Esgotamento Sanitário para empreendimentos de porte mínimo, propomos que a outorga temporária corresponda a uma etapa inicial de cadastro para todos os requerentes, sendo que para empreendimentos de maior porte (vazão de lançamento maior que 4.000 m3/dia) seja necessário apresentar informações complementares, conforme segue.

Para a solicitação de outorga de lançamento, o empreendedor através de seu responsável técnico, deverá inserir em sistema (Sistema de Licenciamento Online ou Sistema de Outorga Online), no mínimo, as seguintes informações:

I – atividade vinculada a outorga de lançamento (SES)
II – declaração de que as metas de universalização não foram atingidas
III – vazão de lançamento
III - concentração dos parâmetros adotados de qualidade do efluente (DBO5, SST, fósforo total, nitrogênio amoniacal e coliformes termotolerantes)
IV – coordenadas geográficas do local de lançamento
V – área de drenagem da bacia hidrográfica a montante do local de lançamento dos efluentes
VI – vazão de referência de outorga do corpo hídrico receptor
VII - classe de enquadramento do corpo hídrico receptor no local de lançamento do efluente
VIII – estudo de capacidade de suporte do corpo hídrico receptor e de vazão de diluição (sendo dispensado para empreendimentos de porte mínimo < 4.000 m3/dia).

O estudo de capacidade de suporte e de vazão de diluição do corpo hídrico receptor, a ser realizado a expensas do empreendedor para empreendimentos com vazão de lançamento superior a 4.000 m3/dia deverá conter no mínimo:

a) memória de cálculo da estimativa da vazão de lançamento (população estimada, quota per capita)
b) tecnologia do tratamento (lagoas, reatores, etc) com memória de cálculo do padrão de qualidade de lançamento, para os parâmetros DBO5, SST, fósforo total, nitrogênio amoniacal e coliformes termotolerantes
c) memória de cálculo da estimativa da vazão de referência para outorga
d) enquadramento do corpo hídrico receptor no local de lançamento
e) concentração permitida para os parâmetros de qualidade adotados no corpo hídrico
f) concentração natural dos parâmetros de qualidade do corpo hídrico
g) estimativa da vazão de diluição (Res CNRH 140/2012)
h) trechos do corpo receptor que estarão em desacordo com o seu enquadramento para cada um dos parâmetros simulados, considerando as curvas de decaimento;
i) identificação dos usos da água existentes nos trechos do corpo receptor em desacordo com o enquadramento;
j) plano de monitoramento do corpo receptor condizente com as conclusões do estudo (em função da relação Qeflu/Qchr).

Os seguintes critérios de análise, são sugeridos.

Para empreendimentos de porte mínimo (*) não havendo inconsistências na observância dos itens relacionados abaixo, poderá ser emitida outorga de lançamento.

I– vazão é compatível com as características da atividade (população atendida horizonte de 10 anos)
II – os parâmetros de qualidade informados estão de acordo com as características da atividade
III - o local de lançamento é num corpo hídrico lótico, perene e enquadrado (caso seja em corpo hídrico intermitente ou efêmero condições especiais deverão ser avaliadas)
IV – a proporcionalidade entre a vazão de lançamento e a vazão de referência, pois este indicador poderá ser utilizado para especificar estratégias de controle como frequência de monitoramento e fiscalização.

Para empreendimentos maiores que porte mínimo deverão ser observados aspectos relacionados a:

I – indisponibilidade de vazão para diluição do parâmetro DBO5

II – indisponibilidade de vazão para diluição do parâmetro fósforo total em locais com histórico de floração de cianobactérias

III - indisponibilidade de vazão para diluição do parâmetro coliformes termotolerantes em trechos de rio com uso da água incompatível com teores elevados deste parâmetro

IV – plano de monitoramento qualitativo e quantitativo do efluente e do corpo hídrico receptor, cujas características (número de locais, frequencia e parâmetros) deverá respeitar características de proporcionalidade entre a vazão de lançamento e do corpo hídrico receptor, e de demais usos dos recursos hídricos.

Estes critérios são aplicáveis a Sistemas de Esgotamento Sanitário que não recebam cargas externas que possuam características distintas de efluentes sanitários como efluentes industriais e de serviços de resíduos sólidos.

Considerações Finais

A Lei Geral de Licenciamento Ambiental aprovada em 2025 tem como um de seus objetivos destravar a implantação de serviços de infraestrutura, dentre eles os sistemas de esgotamento sanitário. Para esta finalidade foi dispensado o licenciamento ambiental, enquanto não for atingido as metas de universalização, sendo exigível outorga de lançamento de efluentes.

No estado do Rio Grande do Sul, o Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento possui sistema de análise e emissão de outorga apenas para captação de água, sendo a implementação de módulo para outorga de lançamento está previsto para o ano de 2030.

Considerando a necessidade de implementação de sistema de outorga de lançamento de forma rápida, afim de atender a demanda de implantação de novos Sistemas de Esgotamento Sanitário, propusemos critérios de outorga a serem considerados pela autoridade outorgante, de forma temporária, enquanto não for implementado o módulo de outorga de lançamento integrado ao módulo de captação de água.

Estes critérios consideram de forma explícita as características de porte de empreendimento, sendo que consideram de forma implícita características dos efluentes e dos corpos receptores.

Do ponto de vista institucional o principal impacto da lei geral de licenciamento ambiental para sistemas de esgotamento sanitário está associado a necessidade do estado implementar sistema de outorga de lançamento de efluentes de forma temporária e em curto prazo.

Do ponto de vista ambiental, devido às características da natureza dos sistemas de esgotamento sanitário e do porte dos empreendimentos de maior demanda, se forem considerados os critérios relacionados neste trabalho, eventuais casos de indisponibilidade hídrica para diluição poderão ser tratados de forma individual, estando restritos a situações excepcionais e reversíveis.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Roessler (FEPAM), ao Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento (DRHS) da Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SEMA), ao programa Prof Água da Agência Nacional de Águas (ANA), ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas. Brasília, [2017].

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. ODS 6 no Brasil: visão da ANA sobre os indicadores. Brasília, [2025].

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução CNRH nº 16, de 8 de maio de 2001. Estabelece critérios gerais para a outorga de direito de uso de recursos hídricos. Brasília, DF: CNRH, [2001].

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução CNRH nº 65, de 22 de setembro de 2006. Estabelece diretrizes gerais para a elaboração de Planos de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas e dá outras providências. Brasília, DF: CNRH, [2006].

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução CNRH nº 91, de 5 de novembro de 2008. Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos. Brasília, DF: CNRH, [2008].

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução CNRH nº 140, de 21 de março de 2012. Estabelece critérios gerais para a classificação de corpos de água superficiais e subterrâneos. Brasília, DF: CNRH, [2012].

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997. Regulamenta os

aspectos do licenciamento ambiental estabelecidos na Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília, DF: CONAMA, [1997].

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF: CONAMA, [2005].

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 377, de 9 de outubro de 2006. Dispõe sobre o licenciamento ambiental simplificado de Sistemas de Esgotamento Sanitário. Brasília, DF: CONAMA, [2006].

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [1981].

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, DF: Presidência da República, [1997].

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Brasília, DF: Presidência da República, [2007].

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Brasília, DF: Presidência da República, [2020].

BRASIL. Lei nº 15.190, de 8 de agosto de 2025. Dispõe sobre o licenciamento ambiental. Brasília, DF: Presidência da República, [2025].

CASTRO, B. V. B.; BROCH, S. A. O.. A Importância da Gestão do Saneamento Básico para os Recursos Hídricos. Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes, [S. l.], v. 13, n. 48, [2025].

NAÇÕES UNIDAS. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. New York: UN, [2015]. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs.

RIO GRANDE DO SUL. Conselho Estadual do Meio Ambiente. Resolução CONSEMA nº 372, de 22 de fevereiro de 2018. Dispõe sobre os empreendimentos e atividades poluidoras ou degradadoras passíveis de licenciamento ambiental no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS: CONSEMA, [2018].

RIO GRANDE DO SUL. Conselho Estadual do Meio Ambiente. Resolução CONSEMA nº 355, de 13 de julho de 2017. Dispõe sobre os critérios para o exercício da competência municipal para o licenciamento ambiental de impacto local no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS: CONSEMA, [2017].

RIO GRANDE DO SUL. Conselho Estadual do Meio Ambiente. Resolução CONSEMA nº 128, de 24 de novembro de 2006. Dispõe sobre a fixação de padrões de emissão de efluentes líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS: CONSEMA, [2006].

RIO GRANDE DO SUL. Decreto nº 58.058, de 14 de março de 2025. [Insira aqui a ementa: descrição curta do objetivo do decreto]. Porto Alegre, RS: Assembleia Legislativa, [2025]. Disponível em: [link do site oficial/DOE]. Acesso em: 3 maio 2026.
RIO GRANDE DO SUL. Lei nº 10.350, de 30 de dezembro de 1994. Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos. Porto Alegre, RS, 1994.

RIO GRANDE DO SUL. Lei nº 15.434, de 9 de janeiro de 2020. Institui o Código Estadual do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS: Assembleia Legislativa, [2020].

RIO GRANDE DO SUL. PLANESAN. Plano Estadual de Saneamento, Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Infraestrutura – SEMA 2022. Disponível em https://sema.rs.gov.br/planesan.

VON SPERLING, M. Estudos e modelagem da qualidade de água em rios. Belo Horizonte: Ed UFMG, 2007. 588p.

GESTÃO COSTEIRA: REVISÃO DA LEGISLAÇÃO AMBIENTAL E DOS DESAFIOS CLIMÁTICOS DA ORLA DE BOA VIAGEM

1 Matheus Gomes Falcão
1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: matheusgomesfalcao@gmail.com

Palavras-chave: Orla; Legislação; Zona Costeira.

Resumo

Boa Viagem se tornou um dos bairros mais valorizados da cidade do Recife, possuindo uma belíssima orla com uma grande diversidade ecológica presente. Todavia, com o iminente crescimento populacional atrelado com as mudanças climáticas, a gestão dessa região traz uma responsabilidade imensa na ótica dos graves impactos ambientais que tomadas de decisões erradas podem acarretar. Nesse contexto o objetivo deste artigo é analisar as consequências socioambientais da gestão costeira com foco na legislação ambiental vigente. Para metodologia foram utilizadas dados secundários e informações qualitativas e quantitativas. Tendo em vista a intensa dinâmica econômica e social que ocorre em grande parte da zona costeira, principalmente nas áreas urbanas, o arcabouço legal que ajuda a regulamentar esse território nem sempre acompanhada de tal dinâmica. Tal fato requer uma atualização desses instrumentos legais que esteja amparada em dados e simulações técnicas, seguindo metodologia científica de modo a contribuir com uma evolução efetiva da gestão costeira.

Introdução

Mudanças climáticas são as transformações climatológicas a longo prazo nos padrões de temperatura e clima, podendo ser provocada ou não pelo homem, o Brasil requer um cuidado maior com suas áreas costeiras devido sua alta concentração populacional (ESPÍNDOLA et al., 2020). Até por isso, sofre cada vez mais com avanço do nível do mar e outras consequências negativas da habitação humana em zonas costeiras.

O crescimento populacional da orla de Boa Viagem se dá a partir da década de 1950 mesmo que a predominância ainda fosse de casas térreas, o processo de verticalização das residências acima de trinta pavimentos inicia a partir de 1980, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) Boa Viagem é o bairro mais populoso do Recife (IBGE, 2010).

Essa urbanização desenfreada acarreta diversos problemas ambientais para os usuários da praia e moradores do bairro, criando ilhas de calor, aumento de resíduos sólidos, intensificação da impermeabilização do bairro além do aumento do trânsito (AMORIM, 2019). Além disso o processo de erosão, que compromete todo o equilíbrio sedimentar da região é afetado pelo aumento demográfico (CÂMARA et al., 2023).

Um dos principais desafios que a cidade do Recife vivência é em relação a drenagem urbana, principalmente nos períodos chuvosos (SILVA et al., 2020) tais características naturais da região metropolitana dificultam a drenagem da cidade, de modo que se agravem com as consequências das mudanças climáticas, como o alto índice pluviométrico das chuvas.

Neste contexto, o referido artigo, se propõe através de revisão bibliográfica, a apresentar sugestões para contribuir com a melhoria na gestão da orla de Boa Viagem e que permitam pensar ferramentas para convivência num cenário de mudanças climáticas.

Resultados e Discussão

Mudanças climáticas impactam diretamente em quase todas as áreas da vida humana, quando se fala em áreas urbanas esses impactos são ainda maiores devido a desenfreada urbanização, podendo levar a casos mais graves como os desastres ambientais (GALATI et al., 2015). Em Recife ocorreram casos recentes como as fortes chuvas de 2022, ocasionando grandes problemas para a cidade e a população de locais críticos, com deslizamentos e alagamentos.

As mudanças sociais que as variações climáticas podem ocasionar são diversas, as populações carentes localizadas no litoral são as primeiras impactadas pelas alterações climáticas, podendo acarretar diversos problemas sociais para a cidade (OLIVEIRA; REHBEIN, 2022). O crescimento populacional desenfreado, movido pelas transformações urbanas decorrente das construções no bairro de Boa Viagem, trazem um grande desequilíbrio social.

É necessário um novo pensamento referente as mudanças climáticas, não se restringindo apenas a impactos ambientais e sim a uma questão da segurança pública, com medidas preventivas de emergência (SILVA et al., 2020). Se medidas não forem tomadas podemos vivenciar um gigantesco deslocamento populacional devido o avanço do nível do mar (SAKA; BOJANG, 2022), o que alteraria completamente a dinâmica da cidade do Recife.

Observa-se que o planejamento urbano é imprescindível para qualquer cidade e centro urbano do planeta, guiando toda a logística da cidade e moldando economicamente e socialmente (PFEIFFER., 2021). Nesse âmbito a orla recifense tem papel fundamental, devido sua função de equilíbrio climático, sendo o grande regulador da temperatura. O nível do mar é um fator que impacta rigorosamente a questão dos alagamentos e inundações, como acontece frequentemente em Recife. Existem diagnósticos que indicam os cenários futuros através de estudos climatológicos, possibilitando a criação de uma zona de proteção para evitar esses desastres ecossistêmicos. Em Itapema, em Santa Catarina foram utilizados softwares de geoprocessamento com modelagem (JANDREY et al., 2020) de cenários possíveis no intuito de identificação de áreas de risco de inundação decorrente do aumento do nível do mar, tendo como guia as previsões do Painel Intergovernamental para a Mudança de Clima (IPCC).

Os oceanos são responsáveis pelo transporte de oxigênio dissolvido, entretanto com o aquecimento das águas devido à concentração atmosférica de gases do efeito estufa elas começam a desoxigenar. O nível do mar tem aumentado desenfreadamente ao longo do último século (LINDSEY, 2017) de modo que em 2016, o nível global do mar estava 82 mm acima da média de 1993, a maior média anual registrada por satélite.

Segundo o relatório do IPCC de 2019, Recife é a 16° cidade do planeta mais ameaçada pelo nível do mar, seja por sua geografia, densidade demográfica costeira e desigualdade social que aflora a orla recifense (IPCC, 2019). Além disso com a junção da poluição que se encontra presente na região são péssimos indicadores para o futuro da região.

Neste particular, a erosão marinha é classificada como o declínio da costa em direção oposta ao sentido do mar, diminuindo a faixa de areia existente. Este processo erosivo é uma das principais consequências do aumento do nível do mar, podendo explicar a baixa densidade do meio faunístico populacional nas regiões erosivas (NOVAK; LAMOUR, 2021). A orla recifense convive evidentemente com este problema, sendo o trecho mais impactado pela erosão a área em frente ao parque Dona Lindu (JUNIOR et al., 2020), onde sequer existe mais faixa de areia no local.

Com o objetivo de analisar a situação ambiental mundial, ocorreu em 1992 a Conferência das Nações Unidas (COP) grande marco ambientalista da histórica da humanidade já que foi a partir da ECO – 92 que o termo desenvolvimento sustentável ganharia cada vez mais força nas políticas públicas mundiais (ECO, 1992).

Como desdobramento dessas discussões, destaca-se a agenda 21 como instrumento fundamental de planejamento sustentável, focado em criações de sociedades sustentáveis em diversos aspectos de modo que seja atrelado os mais importantes métodos de proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica, o capítulo 5 diz respeito à dinâmica demográfica e sustentabilidade. Anda lado a lado com o tema, como dito inicialmente o aumento da densidade demográfica na orla de Boa Viagem foi um dos fatores determinantes para que diversas mudanças socioambientais ocorressem na região, esses processos interativos afetam o uso da terra, da água, do ar, da energia e outros recursos. As cidades em rápido crescimento assim como foi em Recife, caso mal administradas, deparam-se com problemas ambientais gravíssimos (ONU, 1992).

O capítulo 8 dispõe sobre integração entre meio ambiente e desenvolvimento na tomada de decisões (UNO, 1992) se relaciona com o capítulo 5 e por consequência também com o objetivo do estudo, de modo que mais uma vez mostra-se a importância de uma gestão integrada de forma econômica, social e ambiental. Quando feita de modo separada a eficiência desse desenvolvimento sustentável é impactada negativamente, já em casos como no setor de mineração do Canadá que possui apoio governamental e do setor privado através das parcerias para o desenvolvimento sustentável comprovam que quando feita de forma conjunta o resultado acaba sendo muito mais eficiente (VIVODA, 2019).

O capítulo 17 da Agenda 21 se diz respeito com relação à proteção dos oceanos, de todos os tipos de mares – inclusive mares fechados e semifechados e das zonas costeiras, e proteção, uso racional e desenvolvimento de seus recursos vivos (ONU, 1992). Fala sobre a importância não só dos oceanos em si bem como a zona costeira ao seu redor de forma que é essencial para a existência de vida sobre a terra. (ONU, 1992). Como visto em todo o estudo mostrado até aqui é notório perceber a diversidade ambiental, econômica e social que a zona costeira oferece à sociedade. Falando sobre o Recife, temos uma cidade que possui boa parte da sua engrenagem funcionando de acordo com a rotina da orla, seja com a importância ambiental para com fauna e flora que ali possuem seu habitat natural bem como economicamente com todas as pessoas que trabalham na região, desde ambulantes, carroceiros, donos de quiosques e restaurantes. Não menos importante a parte social entra com todos os usuários da praia que utilizam da mesma para seu momento de lazer e turismo, sendo assim a proteção dos oceanos e tudo o que ali se envolve direta e indiretamente com a orla possui necessidade de proteção máxima, mais uma vez reiterando a necessidade dá gestão costeira ser feita com maestria.

No capítulo 18 da Agenda 21 diz respeito à proteção da qualidade e do abastecimento dos recursos hídricos: aplicação de critérios integrados no desenvolvimento, manejo e uso dos recursos hídricos (ONU, 1992). Fala-se sobre a importância da água para o planeta terra. A gestão costeira também está presente neste tema devido sua influência direta nos recursos da água, como sua disponibilidade, secas e enchentes (ONU, 1992). Importante ressaltar que temos a problemática das cheias como algo recorrente na região metropolitana do Recife e que urge por um foco maior dos órgãos competentes.

As metas do milênio foram estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2000, com o apoio de 191 nações, e ficaram conhecidas como Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM). Dentre os oitos objetivos aqueles que mais se relacionam com a realidade da orla de Boa Viagem são os ODM 7 e ODM 8.

O ODM 7 tem como foco a qualidade de vida e respeito ao meio ambiente, integrar os princípios do desenvolvimento sustentável nas políticas e programas nacionais e reverter a perda de recursos ambientais, reduzir a proporção da população sem acesso sustentável à água potável segura e alcançar uma melhora significativa nas vidas de habitantes de bairros degradados (ONU, 2000). Os índices estão relacionados as condições de saneamento básico, que, sem dúvida, precisam ser melhoradas. A sustentabilidade é um assunto extremamente amplo, que precisa cada vez mais ser debatido, desde nos momentos de gestão pública como também em todas as áreas da sociedade, pois é um objetivo que requer um apoio geral de toda a esfera da sociedade para que seja cumprido da maneira que se espera. No que se refere as metas temos alguns indicativos que mostram o avanço do Brasil nesse aspecto, o número de pessoas sem acesso à água no Brasil reduziu de 29,9% para 14,5% entre os anos de 1990 e 2012, indicando que o país já havia atingido parte da respectiva meta em 2012. Já de 1990 a 2012, o esgotamento sanitário aumentou de 53% para 77%, de modo que o Brasil também já havia cumprido essa meta: a população sem acesso ao saneamento básico caiu de 47% para 23% (ROMA, 2019).

Por fim, mas não menos importante, o ODM 8 trata a respeito de metas e indicadores que envolvem cidadãos, governos, sociedade civil, empresas e organizações sociais na direção da sustentabilidade do planeta, da parceria e do trabalho em busca

de melhorias na qualidade de vida de todos (ONU, 2000). Embora o Brasil tenha apresentado avanços significativos nesses indicadores, como a redução da população sem acesso à água potável e o aumento da cobertura de esgotamento sanitário, a realidade da orla de Boa Viagem evidencia que esses avanços não se distribuem de maneira homogênea no território. Em áreas específicas da zona sul do Recife, ainda se observam limitações na infraestrutura urbana. Esse cenário demonstra que o cumprimento de metas em escala nacional não necessariamente se traduz em eficiência local, sobretudo em áreas costeiras altamente urbanizadas. Além disso, a sustentabilidade, no contexto da orla de Boa Viagem, ultrapassa a dimensão ambiental e passa a envolver diretamente questões sociais e urbanísticas, como o uso intensivo do espaço, a pressão sobre os recursos naturais e a desigualdade no acesso a serviços urbanos de qualidade.

Com o intuito de acabar com a pobreza, proteger o planeta e assegurar que todas as pessoas tenham paz e prosperidade os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) são um apelo universal da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015). Alguns dos 17 ODS estão atrelados diretamente com o tema, o ODS 13 trata da Ação contra a mudança global do clima, falando sobre a importância de alterações nas medidas políticas, estratégicas e de planejamento (ONU, 2015). Uma das metas é promover mecanismos para a criação de capacidades para o planejamento relacionado à mudança do clima e à gestão eficaz, no contexto da orla do Recife, essa diretriz relaciona-se diretamente com iniciativas como o Projeto Orla, voltado ao ordenamento territorial e à gestão integrada da zona costeira, embora sua efetividade ainda dependa de maior articulação entre planejamento técnico, fiscalização e participação social.

Já o ODS 14 trata sobre a conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento (ONU, 2015). A conservação das zonas costeiras deve ter como base a legislação nacional e internacional, além da participação cientifica, de modo que essa proteção assegure uma zona costeira mais equilibrada ecologicamente, o que dialoga diretamente com os desafios enfrentados em Boa Viagem, onde processos como erosão costeira, poluição marinha e degradação ambiental comprometem o equilíbrio ecológico da região. A pressão exercida pela urbanização intensiva e pela valorização imobiliária tende a agravar esses problemas, evidenciando a necessidade de políticas públicas mais rigorosas e baseadas em evidências científicas.

No âmbito jurídico, esses compromissos internacionais refletem-se na consolidação de princípios que orientam a legislação ambiental, os Princípios da Legislação Ambiental são guias nas tomadas de decisões do Supremo Tribunal Federal (STF) e Superior Tribunal de Justiça (STJ) de modo que, em tese, ocorra uma diminuição dos impactos ambientais já existentes, todavia é importante ter ciência só surgiram devido do grande aumento de impactos ambientais ao longo dos anos. A vedação ao retrocesso ambiental é um princípio onde afirma que uma nova Lei não poderá ser menos protetiva que a antecedente. Sendo extremamente importante, feita de maneira efetiva se torna uma grande barreira para maiores degradações ambientais. Na gestão costeira é relacionado de maneira protetiva para frear o avanço imobiliário na orla, que vem chegando ao seu limite (COSTA et al., 2008), na prática o avanço imobiliário na região costeira indica uma flexibilização indireta desses parâmetros, especialmente diante de interesses econômicos.

O princípio do Desenvolvimento Sustentável visa promover uma relação harmônica entre seres humanos e a natureza atuando lado a lado com o cenário econômico de cada região, na orla de Boa Viagem temos uma região valorizada financeiramente, porém em desequilíbrio com o meio ambiente (SOUZA et al., 2019). O princípio da Prevenção de Danos é ligado diretamente com a dinâmica costeira já que sabemos de fato quais as consequências ambientais em situações semelhantes à região da zona sul da cidade do Recife, com vasto repertório científico sobre o tema (HAFEZ, 2019).

O princípio do Poluidor Pagador busca impor ao poluidor a obrigação de recuperação e/ou indenização dos danos causados como forma de compensação à degradação. No âmbito das orlas, seja marítima ou fluvial é o custo de indenização por poluição, dos edifícios na região (LINS, 2019) por sua vez, apresenta limitações em sua aplicação efetiva no contexto local, uma vez que os impactos gerados por grandes empreendimentos nem sempre são devidamente compensados ou mitigados. A participação social na legislação ambiental é um dos princípios que se aplica à gestão costeira. Dando voz a sociedade civil, embora previsto na legislação e em instrumentos como o Projeto Orla, ainda enfrenta desafios para se concretizar de maneira ampla e efetiva, sobretudo no que se refere à inclusão das comunidades locais nos processos decisórios (OLIVEIRA; NICOLODI, 2012).

Esses princípios encontram materialização nas normas jurídicas que estruturam a proteção ambiental no ordenamento brasileiro, em 31 de agosto de 1981 foi instituída pela Lei n° 6.938/1981 (BRASIL, 1981) a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), com foco na preservação, melhoria e recuperação do meio ambiente, visando integrar políticas públicas de meio ambiente. Os impactos ambientais que a má gestão costeira pode ocasionar relacionam-se com essa política diretamente. É estabelecido na PNMA o objetivo de preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida junto ao desenvolvimento socioeconômico, na legislação brasileira a Lei n° 8.617/1993 (BRASIL, 1993) dispõe sobre o mar territorial, a zona contígua, a zona econômica exclusiva e a plataforma continental brasileiros, e dá outras providências. Delimitando e zoneando toda a zona costeira, para auxiliar em casos legislativos, importante ressaltar que o mar territorial é uma faixa que vai desde a faixa de areia até doze milhas marítimas, sendo bem extenso.

No que diz respeito a gerenciamento costeiro a Lei n° 7.661/1988 (BRASIL, 1988) dispõe de todo o plano nacional de gerenciamento de risco. Se relaciona com gestão costeira pois é o guia de prioridades à preservação e conservação dos recursos naturais e patrimônio da orla

A Lei n° 9.605/1998 (BRASIL, 1998) dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Abrange quase quaisquer áreas do meio ambiente e suas respectivas as consequências penais para cada ato ilícito ao meio ambiente, sobre zona costeira o Art.33. fala a respeito das

punições aos crimes de poluição ambiental e perecimento de espécimes em ambientes aquáticos. Envolvendo diretamente com a dinâmica da orla, pois além de servir de medida protetiva ao oceano tem o mesmo foco para as espécies biológicas que se encontram na região costeira (BRASIL, 1998, Art. 33 Caput). Outro artigo, da mesma Lei, envolvendo o tema é o Art.50. onde fala sobre a destruição da vegetação nativa. No caso das praias a vegetação rasteira tem papel fundamental para evitar a desertificação, e por isso relaciona-se diretamente (BRASIL, 1998, Art. 50 Caput). Também da mesma Lei, o Art. 54. entra no âmbito da saúde da população, relacionando diretamente ao tema quando se leva em conta que é uma região com alta demanda de banhistas que ao tomar banho em áreas do mar que são impróprias podem ter algum problema de saúde (BRASIL, 1998, Art. 54 Caput).

Lei Municipal nº 16.243/1996 (RECIFE, 1996) estabelece a política do meio ambiente da Cidade do Recife e consolida a sua legislação ambiental, mediante a instituição do Código do Meio Ambiente e do Equilíbrio Ecológico da Cidade do Recife sendo um dos norteadores da legislação ambiental estadual. No âmbito estadual do estudo, foi constatado desequilíbrio ambiental na orla do Recife, indo em contradição com a legislação municipal que tem por pressuposto o direito do povo ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, como bem de uso comum essencial, sendo assim necessário uma maior fiscalização.

Tendo em vista que à ausência de conhecimento pode acarretar inúmeras práticas agressivas ao meio ambiente a Lei nº 12.321/2003 (RECIFE, 2003) cria normas disciplinadoras de utilização da orla marítima, visando a proteção do meio ambiente e do patrimônio turístico e paisagístico pernambucano, regulando a zona costeira para que aja assim um ordenamento e maior controle e fiscalização com as diretrizes essenciais a orla.

Apesar da existência desse arcabouço normativo, desafios persistem na efetividade da gestão ambiental, o que pode ser compreendido a partir de teorias que analisam o uso e a gestão de recursos comuns, sendo evidente a relação do estudo com a "Tragédia dos Comuns", onde a percepção individual do ser humano é tratada como prioridade e acaba acarretando diversos problemas coletivos para a sociedade (HARDIN, 1968). De modo geral, a população não se reconhece como agente causador direto dos impactos ambientais, embora participe cotidianamente do uso da orla, o que contribui para práticas como a poluição e, consequentemente, para a geração de problemas coletivos. Paralelamente, a insuficiência de mecanismos regulatórios eficazes no controle das atividades em áreas costeiras agrava processos de degradação, como a desertificação.

Na "Tragédia dos Comuns", é discutida a questão da condução de recursos comuns e sugere-se que é possível evitar esta tragédia em caso de uma gestão coletiva dos recursos por parte das comunidades locais (OSTROM, 1990). Para o funcionamento da teoria são necessárias regras claras e acordos cooperativos entre todos para evitar a exploração excessiva. Sobre gestão costeira, a teoria já é evidentemente aplicada ao se iniciar o projeto orla, tendo em vista que é uma oportunidade de inclusão das comunidades locais e órgãos competentes tomarem decisões em conjunto, além da definição e ordenação de uma melhor orla para todos que vivem naquela região.

Apesar de já existir uma legislação vigente para o tema, é necessário que ocorra uma atualização das Leis referentes ao meio ambiente, existem brechas na legislação atual que permite grandes empreendimentos encontrarem formas de aumentar sua forma de atuação, sendo extremamente nociva às zonas costeiras. Com uma maior fiscalização e aplicação de medidas realmente cabíveis na Lei de Crimes Ambientais caminharemos de fato para um futuro cada vez mais próspero e promissor.

Nesse sentido, diferentes estratégias podem ser adotadas, abrangendo tanto aspectos técnicos quanto institucionais, como por exemplo a execução do projeto orla, monitoramento ambiental da água e biota da região, evidenciando a aplicação da gestão ambiental. Podem ser adotadas medidas de caráter estrutural, como a implementação de iluminação pública com tecnologia que vise a erradicação do espalhamento de luz para a faixa de areia e zona costeira, de modo a mitigar os efeitos da fotopoluição sobre a biota marinha, a implementação de planos de arborização urbana, a instalação de painéis solares em edificações públicas e o desenvolvimento de sistemas de drenagem mais eficientes para o escoamento das águas pluviais.

Já as medidas legais também devem ser adotadas como reformulação do plano de gerenciamento costeiro (PNGC) no âmbito nacional, Plano Municipal de Gerenciamento Costeiro (PMGC) no âmbito municipal, delimitação de toda orla como área de preservação permanente (APP), Aumentar o número de instrumentos de proteção e preservação contra danos ao meio ambiente costeiro e mudanças climáticas. Medidas educacionais são necessárias para lidar com uma das raízes do problema, a falta de conhecimento. Dessa forma, evidencia-se que a integração entre políticas públicas, instrumentos legais, conhecimento técnico e participação social é essencial para a construção de uma gestão costeira eficaz e sustentável.

Considerações Finais

Recife apresenta elevada vulnerabilidade às mudanças climáticas, em razão de suas características geográficas e de processos históricos de ocupação urbana. A cidade já enfrenta diversos problemas associados à gestão costeira, como alagamentos em consequência de eventos de chuvas intensas, elevação das temperaturas, erosão costeira e aumento do nível do mar, além de ocorrências como ataques de tubarão, que também se relacionam a alterações no ambiente marinho. Embora os impactos das mudanças climáticas sejam observados em escala global, a Região Metropolitana do Recife (RMR) vem sendo apontada por estudos como uma das áreas urbanas mais suscetíveis aos efeitos dessas transformações, o que evidencia a urgência na adoção de medidas efetivas.

Nesse contexto, considerando a relevância da orla sob os aspectos econômico, social e ambiental, torna-se indispensável a implementação de um modelo de gestão pública que atribua a devida prioridade às questões relacionadas ao desenvolvimento sustentável e às mudanças climáticas. Tal abordagem deve contemplar ações integradas de natureza legislativa, técnica e educacional, promovendo a articulação entre o poder público e a sociedade civil no enfrentamento dos impactos ambientais e na construção de estratégias mais resilientes.

Agradecimentos

O autor expressa seu sincero agradecimento à Universidade Federal Rural de Pernambuco pelo suporte acadêmico e institucional que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa. Estende também sua gratidão à DBF Planejamento e Consultoria pelo apoio técnico e pela contribuição fundamental ao longo das etapas do trabalho. Este estudo não seria possível sem a colaboração e o comprometimento dessas instituições com o avanço do conhecimento e o desenvolvimento de soluções aplicadas.

Referências Bibliográficas

AMORIM, M.C.C.T. Ilhas de calor superficiais: frequência da intensidade e variabilidade espacial em cidade de clima tropical continental. **GeoUERJ**, v.12, n.2, p. 4-7, 2019. DOI: https://doi.org/10.12957/geouerj.2019.40959. Acesso em: 08 abr. 2032.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 05 out. 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em 11 out. 2023.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 02 set. 1981. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm . Acesso em: 08 abr. 2023.

BRASIL. Lei n°. 7.661, de 16 de maio de 1988. Institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 mai. 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7661.htm. Acesso em: 08 abr. 2023.

BRASIL. Lei n° 8.617, de 04 de janeiro de 1993. Dispõe sobre o mar territorial, a zona contígua, a zona econômica exclusiva e a plataforma continental brasileiros, e dá outras providências. **Diário Oficial da União, Brasília**, DF, 04 jan. 1993. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8617.htm. Acesso em: 08 abr. 2023.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 fev. 1998. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm. Acesso em: 08 abr. 2023.

CÂMARA, I.F; HOLANDA, T.F; COSTA, M.B. Erosão e gestão costeira em praias protegidas por recifes no litoral sul de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.24, n.1, p. 3-23, 2023. DOI: https://doi.org/10.20502/rbg.v24i1.2189. Acesso em: 08 abr. 2023.

COSTA, M.F.; ARAÚJO, M.C.B.; CAVALVANTI, J.S.S.; SOUZA, S.T. Verticalização da Praia da Boa Viagem (Recife, Pernambuco) e suas Consequências Sócio-Ambientais. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 8, n. 2, p. 233-245, 2008. Disponível em: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388340124017. Acesso em: 08 abr. 2023.

ESPÍNDOLA, I. B.; RIBEIRO, W. C. Cidades e mudanças climáticas: desafios para os planos diretores municipais brasileiros. **Cadernos Metrópole**, v.22, n. 48, p. 365-396, 2020. DOI: 10.1590/2236-9996.2020-4802. Acesso em: 08 abr. 2023.

GALATI, E. A. B.; CAMARA, T. N. L.; NATAL, D.; CHIARAVALLOTI-NETO, F. Mudanças climáticas e saúde urbana. **Revista USP**, v.1, n. 107, p. 79-90, 2015. DOI: https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i107p79-90. Acesso em 08 abr. 2023.

HAFEZ, A. Bangladesh Coastal Zone Management Status and Future Trends. **Journal of Coastal Zone Management**, v. 22, n. 1, p. 1-7, 2019. DOI: 10.4172/2473-3350.1000466. Acesso em: 08 abr. 2023.

HARDIN, G. The tragedy of the commons. **Science**, v. 162, n. 3859, p. 1243-1247, 13 Dec. 1968. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/1724745. Acesso em 08 abr. 2023.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRÁFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html . Acesso em: 08 abr. 2023.

IPCC- PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas**. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf. Acesso em: 08 abr. 2023.

JANDREY, S.; AUMOND, J. J. Mudanças climáticas e planejamento urbano: cenários futuros de aumento do nível do oceano no município de Itapema/SC. **PerCursos**, v. 21, n. 46, p. 025 - 053, 2020. DOI: 10.5965/1984724621462020025. Acesso em: 2 fev. 2023.

JUNIOR, G.S.S.; GREGÓRIO, M.N.; CARNEIRO, M.C.S.N.; BARRETO, E.P.; COSTA, G.J.A.; MELO, W.D.A. Análise da Evolução da Linha de Costa da Região Metropolitana Sul da Cidade do Recife. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, n.04, p 1645-1674, 2020. Acesso em: 08 abr. 2023.

LIMBURG, K. E. Ocean Deoxygenation: A Primer. **Research, Society and Development**, v. 12, n.1, p. 20-35, 2021. DOI: 10.44859/rsd-v10i4.95890. Acesso em 08 abr. 2023.

LINDSEY, R. Climate Change: Global Sea Level. **Research, Society and Development**, v. 1, n.2, p. 3-4, 2022. DOI: 10.37789/rsd-v10i4.14566. Acesso em 08 abr. 2023.

LINS, K.J.P.; LINS, M.A.F. Saneamento básico: impacto do esgoto despejado na orla de Olinda-PE. **Holos Environment**, v.19, n.2, p. 220-234, 2019. DOI: http://dx.doi.org/10.14295/holos.v19i2.12318. Acesso em: 08 abr. 2023.

NOVAK, L. P.; LAMOUR, M.R. Avaliação do risco à erosão costeira em praias urbanizadas do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 22, n. 1, p. 164-185, 2021. DOI: https://doi.org/10.20502/rbg.v22i1.1661. Acesso em: 08 abr. 2023.

OLIVEIRA, A; REHBEIN, M. O. Vulnerabilidade social no litoral lagunar do Rio Grande do Sul: mapeamento de índice de vulnerabilidade social para a orla municipal de Pelotas-RS. **GEOUSP Espaço e Tempo**, v. 26, n. 3, 2022. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geousp.2022.192343. Acesso em 08 abr. 2023.

OLIVEIRA, M.R.L.; NICOLODI, J.L. A Gestão Costeira no Brasil e os dez anos do Projeto Orla, Uma análise sob a ótica do poder público. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 12, n.1, p. 89-98, 2012. Disponível em: https://repositorio.furg.br/bitstream/handle/1/2074/A%20Gest%C3%A3o%20Costeira%20no%20Brasil%20e%20os%20dez%20anos%20do%20Projeto%20Orla..pdf?sequence=1. Acesso em: 08 abr. 2023.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Agenda 21**. 1992a. Disponível em: http://www.onu.org.br/agenda21/ . Acesso em: 08 abr. 2023.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio**. 1992b. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/66851-os-objetivos-de-desenvolvimento-do-mil%C3%AAnio. Acesso em: 08 abr. 2023

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: 17 objetivos para transformar o mundo**. 2015. Disponível em: https://nacoesunidas.org/pos2015/ . Acesso em: 08 abr. 2023

OSTROM, E. **GOVERNING the COMMONS: The Evolution of Institutions for Collective Action**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

PEIXOTO, F.S.; RODRIGUES, J.P.B.; ALBUQUERQUE, P.I.M. Gestão Integrada dos Recursos Hídricos e a Problemática das Inundações Urbanas. **Geografia Londrina**, v.28, n. 1, p. 187-206, 2019. DOI: 10.5433/2447-1747.2019v28n1p187. Acesso em: 08 abr. 2023.

PFEIFFER, J. A. The importance of urban planning: Views of greenness and open space is reversely associated with self-reported views and depressive symptoms. **Population medicine**, v. 3, n.1, p. 20, 2021. DOI: 10.18332/popmed/139173. Acesso em 08 abr. 2023.

RECIFE. Lei n°. 12.321, de 06 de janeiro de 2003. Cria normas disciplinadoras de utilização da orla marítima, visando a proteção do meio-ambiente e do patrimônio turístico e paisagístico pernambucano. **ALEPE**, Recife, PE, 06 jan. 2003. Disponível em: http://legis.alepe.pe.gov.br/texto.aspx?id=4366&tipo=TEXTOORIGINAL . Acesso em 08 abr. 2023.

RECIFE. Lei n°. 16.243, de 13 de Setembro de 1996. Estabelece a política do meio ambiente da cidade do recife e consolida a sua legislação ambiental, mediante a instituição do código do meio ambiente e do equilíbrio ecológico da cidade do recife. **ALEPE**, Recife, PE, 13 set. 1996. Disponível em: http://licenciamentoambiental.recife.pe.gov.br/1624396#:~:text=16.243%2F96,-Tipo%20de%20Legisla%C3%A7%C3%A3o&text=Ementa%3A,ECOL%C3%93GICO%20DA%20CIDADE%20DO%20RECIFE. Acesso em: 08 abr. 2023.

ROMA, J.C. Os objetivos de desenvolvimento do milênio e sua transição para os objetivos de desenvolvimento sustentável. **Cienc**, v.71, n.1, p.33-39, 2019. DOI: 10.21800/2317-66602019000100011. Acesso em 08 abr. 2023.

SAKA, L.; BOJANG, O.M. insurgência do boko haram e deslocamento forçado no nordeste da Nigéria: uma avaliação das estratégias de gestão do estado. **Revista Brasileira de Estudos Africanos**, v. 7, n. 14, p. 91-118, 2022. DOI: https://doi.org/10.22456/2448-3923.123449. Acesso em: 08 abr. 2023.

SILVA, M.A.; XAVIER, D.R.; ROCHA, V. Do global ao local: desafios para redução de riscos à saúde relacionados com mudanças climáticas, desastre e Emergências em Saúde Pública. **Saúde Debate**, v. 44, n. 2, p. 48-68, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/0103-11042020E204. Acesso em: 08 abr. 2023.

SILVA, J. M. A. B; CABRAL, J. J. S. P; FONSECA, N. G. C; SILVA, P. O; GUERRA, C. M. F; SILVA, S. R. Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana em cenário de mudança do clima no Recife-PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n.3, p. 302–318, 2020. DOI: https://doi.org/10.24221/jeap.5.3.2020.3025.302-318. Acesso em: 08 abr. 2023.

SOUZA, N.L.; TORRES, M.F.; JÚNIOR, A.V.F. Percepção Ambiental e Inventário dos Serviços Ecossistêmicos nas Praias do Pina e Boa Viagem, Recife, Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 4, p. 1238-1251, 2019. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/239557. Acesso em: 08 abr. 2023.

VIVODA V, KEMP D. How do national mining industry associations compare on sustainable development? **The Extractive ndustries and Society**, v. 6, n. 1, p. 22-28, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.06.002. Acesso em: 08 abr. 2023.

LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE POSTOS DE COMBUSTÍVEIS EM ALTAMIRA (PA): EVOLUÇÃO NORMATIVA E IMPLICAÇÕES PARA A PROTEÇÃO AMBIENTAL

Alessandra Santos Mota
Universidade do Estado do Pará, e-mail: alessandra.mota@uepa.br

Palavras-chave: Amazônia, posto de combustível, contaminação.

Resumo

O licenciamento ambiental é um dos principais instrumentos de gestão ambiental no Brasil, especialmente no controle de atividades potencialmente poluidoras, como os postos de combustíveis. No município de Altamira (PA), marcado por intensa expansão urbana e elevada sensibilidade ambiental, mudanças recentes na legislação local têm gerado questionamentos quanto à efetividade desse instrumento. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar a evolução normativa do licenciamento ambiental de postos de combustíveis no município, com ênfase nas alterações introduzidas pela Lei nº 3.561/2025 e suas implicações para a proteção ambiental. A pesquisa foi conduzida por meio de abordagem qualitativa, de caráter exploratório, utilizando-se análise documental de normas federais, estaduais e municipais. Foram examinados os principais dispositivos legais que regulam o licenciamento ambiental da atividade, com posterior comparação entre os critérios anteriormente adotados e aqueles atualmente vigentes no município. Os resultados evidenciam que a legislação municipal passou por um processo de flexibilização, sobretudo no que se refere à redução das distâncias mínimas entre postos de combustíveis e áreas sensíveis, anteriormente fixadas em 100 metros e atualmente reduzidas para 25 metros. Embora tenham sido incorporadas exigências tecnológicas mais avançadas, como sistemas de monitoramento e contenção, essa mudança pode ampliar a exposição de áreas urbanas vulneráveis a riscos de contaminação do solo e das águas subterrâneas. Observou-se ainda um descompasso entre a normativa municipal e os parâmetros mais restritivos estabelecidos em âmbito estadual e federal, o que levanta preocupações quanto à manutenção da função preventiva do licenciamento ambiental. Conclui-se que, embora a autonomia municipal permita adequações às dinâmicas locais, tais alterações devem ser acompanhadas de rigor técnico e institucional compatível com os riscos da atividade. Recomenda-se maior harmonização entre os diferentes níveis normativos, de modo a garantir a efetividade do licenciamento ambiental como instrumento de proteção dos recursos naturais e da saúde pública.

Introdução

A promulgação da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), instituída pela Lei nº 6.938, de 1981, representa um marco fundamental na consolidação da legislação ambiental brasileira. A partir deste instrumento normativo, o licenciamento ambiental foi estabelecido como um dos principais mecanismos de gestão, com a finalidade de compatibilizar o desenvolvimento econômico com a proteção ambiental, sobretudo no que se refere às atividades efetiva ou potencialmente poluidoras.

Neste contexto, o licenciamento ambiental foi consagrado como instrumento central para o controle de empreendimentos que fazem uso de recursos naturais ou que podem potencialmente causar degradação ambiental. A regulamentação deste instrumento foi posteriormente detalhada por normas mais específicas, com destaque para a Resolução nº237, de 1997, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o qual estabelece os procedimentos e critérios aplicáveis ao licenciamento ambiental no país.

De acordo com a resolução ficam sujeitas ao licenciamento a localização, construção, instalação, ampliação, modificação e operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras, bem como aquelas capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental. Tal exigência está correlacionada ao dever legal previsto na Constituição Federal de 1988, em seu Art. 225, o qual dispõe sobre a exigência de estudo prévio de impacto ambiental para essas atividades com potencial de causar significativa degradação ambiental.

No Brasil, destacam-se três modalidades de licença ambiental com funções específicas ao longo do ciclo de vida de um empreendimento, sendo elas: Licença Prévia (LP) com intuito de avaliar ainda na fase de planejamento a viabilidade do empreendimento e sua atividade; Licença de Instalação (LI), que visa autorizar a possível implantação do empreendimento diante da adoção de medidas de controle adequadas e previamente acordados com o órgão ambiental e Licença de Operação (LO), que autoriza o início das atividades mediante também o cumprimento de condicionantes ambiental pre estabelecidas.

Mais recentemente, mudanças fundamentais neste contexto foram provocadas pela Lei nº 15.190 de 2025, na qual o licenciamento ambiental passou a contar com os seguintes tipos de licença ambiental, além das previamente citadas: Licença Ambiental Única (LAU); Licença por Adesão e Compromisso (LAC); Licença de Operação Corretiva (LOC); e Licença Ambiental Especial (LAE).

A promulgação desta nova lei trouxe consigo discussões a respeito da inflexão provocada no modelo tradicional de licenciamento ambiental até então adotado no Brasil, trazendo consigo mecanismos de simplificação e flexibilização de seus procedimentos relativos à regularização ambiental de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras.

Apesar das inovações incorporadas pela Lei 15.190/2025, certas atividades econômicas permaneceram classificadas como efetiva ou potencialmente poluidoras, exigindo controle por meio do licenciamento ambiental, seguindo todas as etapas cabíveis ao procedimento. Entre essas atividades, destaca-se empreendimentos como os de postos de combustíveis, os quais apresentam elevado risco de contaminação do solo e das águas subterrâneas em função do armazenamento e manuseio de derivados de petróleo. Tais riscos ambientais são associados, sobretudo, a possíveis vazamentos em sistemas subterrâneos e à presença de compostos tóxicos, como os hidrocarbonetos aromáticos como BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos). Esses compostos tóxicos são móveis na água e podem atingir longas distâncias, incluindo fontes de abastecimento de água humano, e, portanto, exigem critérios técnicos rigorosos e monitoramento contínuo (SOUTO & PENNER, 2020).

Após a descentralização das competências federativas relativas ao licenciamento ambiental, promovida pela PNMA (Lei nº 6.938/1981) e consolidada pela Constituição Federal de 1988, a definição da competência para o licenciamento das atividades de revenda de combustíveis foi estabelecida de maneira mais específica pela Resolução nº237/97, que dispõe sobre os critérios para distribuição de responsabilidades no âmbito da união, estados e municípios. No âmbito estadual, destaca-se a Resolução nº 198/2026 do Conselho Estadual de Meio Ambiente (COEMA/PA), que estabelece as atividades sujeitas ao licenciamento ambiental no estado do Pará, incluindo aquelas relacionadas à comercialização de combustíveis.

No âmbito municipal, especificamente no município de Altamira, localizado do sudoeste paraense, tem-se a resolução COMAM 039/2021 e 041/2022 que dispõem sobre as atividades a serem licenciadas no âmbito do município, no qual tem-se também, dentro do escopo municipal a atividade de comercialização de combustíveis, de acordo com porte estabelecido para sua atuação, que contempla atualmente cerca de 26 postos de combustíveis em fase de operação e 2 em análise de Licença prévia.

Diante do cenário ambiental sensível apresentado, a legislação municipal específica para o caso assume papel fundamental na operacionalização do licenciamento ambiental, uma vez que operacionaliza a regularização de empreendimentos do setor dentro do âmbito local. No caso do município de Altamira, a legislação pertinente deve refletir não apenas as diretrizes estabelecidas nas esferas de governo federal e estadual, mas também as particularidades ambientais e urbanas locais. Diante disso, mudanças substanciais têm sido notadas a regulação local para instalação de postos de combustíveis. Tais alterações suscitam questionamentos sobre a efetividade do licenciamento ambiental e sua capacidade de estabelecer critérios técnicos claros, mecanismos de controle adequados e instrumentos de fiscalização eficientes.

Nota-se que apesar da existência de um arcabouço normativo consolidado em nível federal e estadual, ainda são escassos os estudos que analisam criticamente a aplicação dessas normas em escala municipal, especialmente no contexto amazônico, o que acaba limitando a compreensão sobre a efetividade do licenciamento ambiental como instrumento de prevenção de impactos em nível local.

Nesse sentido, este trabalho vem a contribuir na análise da normativa municipal a fim de identificar possíveis lacunas, inconsistências ou fragilidades que possam comprometer a função preventiva do licenciamento ambiental, especialmente em atividades de elevado risco de contaminação, como a revenda de combustíveis.

Metodologia

Esta pesquisa consiste em um estudo de caso, de natureza qualitativa e exploratória, com foco na análise do arcabouço normativo aplicado ao licenciamento ambiental de postos de combustíveis no município de Altamira, no Pará. A abordagem qualitativa, conforme descrita por Godoy (1995) & Tomaszewski (2020) foi adotada por permitir a interpretação crítica de instrumentos legais e institucionais, enquanto o caráter exploratório, de acordo com Busetto, Wick, e Gumbinger (2020) busca a compreensão em profundidade neste caso com base na sistematização de estudos voltados à análise normativa em contextos municipais específicos.

O estudo é aplicado ao município de Altamira localizado na Amazônia Legal, região Norte do Brasil. O município apresenta características marcadas por picos de expansão urbana, mais recentemente associadas à instalação de grandes empreendimentos, como a Hidroelétrica de Belo Monte, associados à processos de desenvolvimento regional que tem intensificado a instalação de empreendimentos econômicos e consequentemente que exercem atividades potencialmente poluidoras, como a instalação de postos de combustíveis.

Além disso, a sede urbana municipal possui elevada sensibilidade ambiental, especialmente no que se refere a abundância e disponibilidade de recursos hídricos superficiais e subterrâneos, em função de sua inserção na bacia hidrográfica do Rio Xingu e da presença de seus afluentes, o que reforça a relevância do controle ambiental de contaminantes por meio do licenciamento. A localização da área de estudo está representada na Figura 01, na qual pode-se observar que a configuração espacial do município é marcada pela proximidade entre áreas urbanas e corpos hídricos, além de vetores de expansão urbana.



Figura 06: Perímetro urbano e áreas de sensibilidade ambiental no município de Altamira (PA). Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A elaboração do mapa de localização foi realizada a partir de imagem de satélite obtida por meio do software Google Earth Pro, com posterior delimitação do perímetro urbano e das áreas de interesse ambiental com base em dados do Zoneamento Ambiental presente no Plano Diretor Municipal de Altamira (2015). O processamento e a organização cartográfica foram conduzidos de forma a evidenciar a relação entre a área urbana e os elementos ambientais sensíveis, com destaque para a proximidade com corpos hídricos. Por meio do mapa, é possível observar a legenda com destaque para as zonas de expansão urbana (polígono marrom) e as zonas de interesse paisagístico e ambiental (polígonos verde).

A coleta de dados foi realizada por meio de dados secundários abrangendo diferentes níveis normativos da legislação federal, normas estaduais, e legislação municipal aplicável ao licenciamento ambiental no município de Altamira. Os dados coletados foram submetidos a uma análise documental sistemática, compreendendo a leitura crítica dos instrumentos normativos; identificação e extração de critérios técnicos relacionados ao licenciamento de postos de combustíveis; classificação das exigências ambientais, considerando aspectos como controle de poluição, monitoramento ambiental, prevenção de riscos e condicionantes operacionais. Por fim, foi realizada uma análise comparativa entre os diferentes instrumentos normativos, com objetivo identificar convergências, divergências e possíveis lacunas no arcabouço legal aplicado ao licenciamento ambiental. Os dados obtidos por meio da análise da legislação local foram organizados por meio de quadro comparativo, evidenciando diferenças e similaridades entre normas e suas principais alterações no âmbito do município, além de destacar os principais critérios técnicos exigidos.

A autora declara que utilizou ferramentas de Inteligência Artificial como apoio ao desenvolvimento deste trabalho. O ChatGPT foi empregado na estruturação inicial do texto e na revisão gramatical, sem interferência na análise científica ou nos resultados apresentados. A ferramenta NotebookLM foi utilizada como suporte para leitura e organização de conteúdos, enquanto o Consensus auxiliou na identificação de literatura acadêmica relevante. Ressalta-se que todas as interpretações, análises e conclusões são de responsabilidade exclusiva da autora.

Resultados e Discussão

Os resultados encontrados por meio do levantamento normativo evidenciam que o licenciamento ambiental de postos de combustíveis no município de Altamira está inserido em um arcabouço legal que articula normas federais, estaduais e municipais. No âmbito federal, as leis e resoluções que estruturam o licenciamento e o controle de atividades potencialmente poluidoras, com destaque para a Lei nº 6.938/1981, conhecida como a Política Nacional do Meio Ambiente, que em seu art. 9 e 10 reconhece o licenciamento ambiental como instrumento fundamental da PNMA bem como exige o licenciamento para atividades efetiva ou potencialmente poluidoras, e a Lei nº 9.605/1998, Lei de Crimes Ambientais, que regulamentada pelo

Decreto nº 6.514/2008, tipifica crimes e infrações ambientais e estabelece sanções administrativas aplicáveis também aos postos de combustíveis.

Além do arcabouço legal tem-se ainda as normativas do Conselho Nacional do Meio Ambiental – CONAMA, onde destacam-se como marco a Resolução CONAMA nº 01/1986, que traz consigo a exigência de Estudo de Impacto Ambiental e seu respectivo Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) para empreendimentos de significativo impacto ambiental. Também se insere neste contexto, a Resolução CONAMA nº 237/1997, que organiza o sistema de licenciamento elencando quais procedimentos e critérios devem ser utilizados para o licenciamento ambiental. Dentre as resoluções CONAMA com maior destaque para o tema aplicam-se ainda a Resolução CONAMA nº 273/2000, que torna obrigatória a investigação de passivos ambientais em postos de combustíveis e serviços, e a Resolução CONAMA nº 420/2009, que define critérios e valores de referência para solo e águas subterrâneas na gestão de áreas contaminadas, frequentemente associadas a essa atividade.

Também incidem sobre o licenciamento da atividade de posto de combustíveis as normas setoriais, como a NR-20 (Portaria SIT/MTE nº 308/2012), relativa à segurança e saúde no trabalho com inflamáveis e combustíveis, o Anexo 2 da NR-9 (Portaria MTPS nº 1.109/2016), que trata da exposição ocupacional ao benzeno em postos revendedores de combustíveis, e resoluções da ANP (nº 40/2013, nº 57/2014 e nº 948/2023), que disciplinam especificações da gasolina e atualizam o arcabouço regulatório dos postos revendedores.

Neste contexto, a repartição de competências entre os entes federativos da União, Estados e Municípios para licenciamento e fiscalização ambiental é definida pela Lei Complementar nº 140/2011, que atribui aos municípios a responsabilidade por atividades de impacto predominantemente local, que são delimitadas também pela Resolução nº 198/2026 do Conselho Estadual de Meio Ambiente (COEMA/PA), como citado anteriormente. Ainda no âmbito do estado do Pará, o licenciamento de postos revendedores é orientado pela Instrução Normativa SEMAS nº 11/2011, que estabelece diretrizes para o licenciamento de Posto Revendedor (PR), Posto de Abastecimento (PA), Instalações de Sistema Retalhista (ISR) e Posto Flutuante (PF).

Na esfera municipal, o licenciamento da atividade de posto de combustível em Altamira, é regulamentado de forma específica assim como o ordenamento territorial desses empreendimentos por meio da Lei nº 3.561/2025, que alterou recentemente dispositivos centrais da Lei nº 3.397/2022 e articula-se com o Código de Obras do município (Lei nº 3.195/2014).

Por meio da análise conjunta dessas normas podemos compreender o enquadramento jurídico dos postos de combustíveis no município de Altamira e assim fundamentar a avaliação da prática local de licenciamento, à semelhança do que foi observado como resultado em outros municípios brasileiros, como Belém-PA e Niterói-RJ (DE FRANCESCHI, 2022; OLIVEIRA, 2020 e SOUTO, 2020).

Tendo em vista a legislação municipal de Altamira, as regras legais estabelecidas para a instalação de postos de combustíveis evoluíram essencialmente do Código de Obras (2014) para regulamentações mais específicas em 2022, sendo recentemente atualizada pela Lei 3.561 de 2025. Abaixo, é apresentado um quadro comparativo que traz as principais alterações e os critérios vigentes pelas regras ambientais no município:

Critério de instalação	Regulamentação anterior (Leis 3.195/2014 e 3.397/2022)	Regulamentação atual (alterações da Lei 3.561/2025)
Distanciamento de áreas sensíveis	Raio mínimo de 100 metros de hospitais, escolas, creches e templos religiosos e outros.	Reduzido para 25 metros de raio de clínicas médicas com leitos de internação, hospitais, creches, APPs e outros sob critérios rigorosos de segurança, tais como tanques de parede dupla e *sumps* de bomba.
Localização do lote	No perímetro urbano, a instalação era obrigatória em terreno de esquina.	Passa a ser preferencialmente em esquina; a exigência passa ser dispensada mediante análise técnica de segurança viária.
Testada do terreno	Mínimo obrigatório de 40 metros de testada.	Preferencialmente 40 metros; o órgão de planejamento municipal pode autorizar a redução se não houver comprometimento da segurança.
Tecnologias de Segurança	Foco em distanciamento e licenciamento ambiental prévio.	Exigência de tecnologias modernas: tanques de parede dupla com monitoramento eletrônico, sistemas de contenção (sumps) e Plano de Atendimento a Emergências (PAE).
Licenciamento ambiental	Exigência de Licença Prévia (LP), Instalação (LI) e Operação (LO).	Mantido, mas com citação de novos critérios de segurança e monitoramento eletrônico intersticial.

Quadro 01: Comparativo das principais alterações para instalação de postos de combustíveis em Altamira-PA. Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A análise do Quadro 01 evidencia uma mudança de paradigma regulatório, na qual critérios baseados predominantemente em distanciamento foram parcialmente substituídos por exigências tecnológicas. Observa-se que as alterações recentemente introduzidas na legislação municipal, fez com que os empreendimentos que vierem a se sujeitar ao licenciamento de postos de combustíveis no município devam atender a um conjunto de requisitos técnicos adicionais, que embora sejam práticas comuns a nível nacional, não eram claramente especificados na legislação municipal. Entre eles, destaca-se a exigência de proteção do lençol

freático, prevendo-se que a cota do aquífero na área de instalação dos tanques se situe, no mínimo, a cinco metros de profundidade, exigindo-se ainda a apresentação de estudo e laudo hidrogeológico elaborados por profissional habilitado.

As normas estabelecem, ainda, a obrigatoriedade de instalação de, no mínimo, três dispositivos de monitoramento da água subterrânea, sendo um a montante e dois a jusante do empreendimento, o que visa garantir o controle sistemático da qualidade da água nos arredores dos empreendimentos. Os postos também devem realizar o controle de estoque do combustível armazenado nos tanques e devem obrigatoriamente comunicar imediatamente aos órgãos ambientais na ocasião de da variação de estoque físico que indique perda diária superior a 0,6% do volume armazenado.

No que se refere aos requisitos para parcelamento e ocupação do solo, as normas municipais têm exigido o atendimento de distanciamento técnico entre bombas e tanques, com recuo mínimo de 8,00 m em relação ao alinhamento predial e de 5,00 m em relação às divisas laterais e de fundos. Os serviços adicionais prestados por alguns postos da região, que podem incluir a lavagem e lubrificação, são admitidos desde que disponham de sistema de drenagem independente, dotado de caixas separadoras de óleo e combustível antes do lançamento na rede pública. Por fim, o acesso viário ao posto deve apresentar largura entre 4,00 m e 7,00 m, respeitando-se o afastamento mínimo de 3,00 m em relação ao ponto de concordância da curva de esquina.

Com isso, os resultados baseados nos critérios adotados pelo município de Altamira para licenciamento e instalação de postos de combustíveis na região, nos permite depreender que ao reduzir as distâncias mínimas entre postos de combustíveis e áreas sensíveis, foi introduzida cerca flexibilização no controle territorial dessa atividade.

Essa alteração merece análise cautelosa uma vez que do ponto de vista municipal bem como dos demais entes federativos, a atividade é reconhecidamente tida como potencialmente poluidora, em função dos riscos de vazamentos, contaminação do solo, águas subterrâneas e corpos hídricos superficiais, caso não sejam adotadas as medidas de controle adequadas.

Contudo, embora a norma municipal tenha competência para disciplinar aspectos de uso e ocupação do solo, sua aplicação não deve fragilizar os parâmetros preventivos estabelecidos pelas normas federais e estaduais. A Resolução CONAMA nº 273/2000 exige que o licenciamento de postos considere a caracterização do entorno, incluindo edificações existentes em raio de 100 m, poços de captação, corpos d'água e áreas potencialmente vulneráveis.

De modo semelhante, a Instrução Normativa SEMAS nº 11/2011 estabelece critérios técnicos para avaliação locacional, hidrogeológica e ambiental dos empreendimentos de revenda de combustíveis no Estado do Pará, incluindo a distância mínima de 100 metros dos limites de escolas, quartéis, asilos, hospitais e casas de saúde e locais considerados de grande aglomeração.

Neste contexto, a redução das distâncias mínimas no âmbito municipal para 25 metros pode gerar tensão entre a lógica urbanística local e a função preventiva do licenciamento ambiental. Ainda que a legislação municipal busque viabilizar a instalação de empreendimentos no perímetro urbano destacando o rigor técnico por meio das exigências de tecnologias aplicadas ao controle da contaminação desses empreendimentos, tal flexibilização pode ampliar, quando não bem conduzidas, a exposição de escolas, hospitais, áreas residenciais, APPs, sistemas de drenagem e recursos hídricos a riscos associados ao armazenamento e manuseio de combustíveis.

Assim, os resultados indicam que a flexibilização normativa observada no município de Altamira evidencia a necessidade de maior harmonização entre o planejamento urbano municipal e os parâmetros ambientais estabelecidos em escala estadual e federal, especialmente em áreas urbanas ambientalmente sensíveis, como aquelas inseridas na bacia do Rio Xingu. Ademais, a efetividade dessas medidas depende diretamente da capacidade técnica e operacional do órgão ambiental municipal, que, em muitos casos, se apresenta como fator limitante para o monitoramento contínuo e a adequada fiscalização dessas atividades.

Considerações Finais

Diante da análise das principais alterações na legislação municipal de Altamira realizada, verifica-se que a recente alteração da legislação municipal flexibilizou critérios de localização dos empreendimentos de postos de combustíveis, especialmente pela redução das distâncias mínimas em relação a áreas sensíveis aos riscos da atividade. Com isso, as alterações promovidas introduziram um fator potencial de fragilização do controle territorial dessa atividade.

Como pode-se notar, tal dinâmica normativa mostra-se em dissonância com as diretrizes estaduais e federais, que adotam parâmetros mais restritivos baseados na lógica da precaução e da prevenção de riscos ambientais. Os resultados evidenciam que: (i) há um descompasso entre o regramento municipal e os instrumentos de gestão ambiental de outras esferas federativas, particularmente no tocante aos critérios locacionais; (ii) o potencial aumento da vulnerabilidade de áreas reconhecidamente sensíveis tais como: escolas, unidades de saúde, corpos hídricos e áreas residenciais frente a acidentes e contaminações no município; (iii) a influência da limitada capacidade institucional do órgão ambiental local na efetividade da fiscalização e do controle da contaminação promovida por estas atividades.

Conclui-se que a autonomia municipal utilizada para adequar normas às especificidades do território não pode resultar no esvaziamento da função preventiva do licenciamento ambiental. Em áreas urbanas como o município de Altamira, eventuais flexibilizações de critérios locacionais de atividade efetiva e potencialmente poluidoras devem ser acompanhadas de rigor técnico, institucional e participativo, de forma a assegurar a proteção dos recursos naturais e a segurança da população.

Por fim, recomenda-se o fortalecimento da harmonização entre os diferentes níveis normativos e a incorporação, no âmbito municipal, de parâmetros técnicos consistentes e alinhados às boas práticas de gestão ambiental. Tais medidas são essenciais para que o licenciamento ambiental mantenha seu papel como instrumento central de prevenção de impactos, de ordenamento do uso e ocupação do solo e de promoção de cidades mais seguras e ambientalmente sustentáveis.

Agradecimentos

A autora gostaria de agradecer à Universidade do Estado do Pará, campus IX Altamira, pelas condições institucionais e infraestruturais disponibilizadas para a realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ALTAMIRA (PA). Lei nº 3.561, de 2025. Altamira, PA, 2025.

ALTAMIRA (PA). Lei nº 3.195, de 08 de maio de 2014. Altamira, PA, 2014.

ALTAMIRA (PA). Lei nº 3.397, de 2022. Altamira, PA, 2022.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Resolução nº 40, de 25 de outubro de 2013. Regula as especificações das gasolinas de uso automotivo, consoante as disposições contidas no Regulamento Técnico nº 3/2013, parte integrante desta Resolução, e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos diversos agentes econômicos que comercializam o produto em todo o território nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2013.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Resolução nº 948, de 2023. Regulamenta a autorização para o exercício da atividade de revenda varejista de combustíveis automotivos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2023.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 fev. 1986.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 dez. 1997.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 273, de 29 de novembro de 2000. Dispõe sobre a instalação de sistemas de armazenamento de derivados de petróleo e outros combustíveis. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 08 jan. 2001.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 dez. 2009.

BRASIL. Decreto nº 6.514, de 22 de julho de 2008. Dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente e estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 jul. 2008.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 02 set. 1981.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 fev. 1998.

BRASIL. Lei nº 15.190, de 8 de agosto de 2025. Dispõe sobre o licenciamento ambiental; regulamenta o inciso IV do § 1º do art. 225 da Constituição Federal; altera as Leis nºs 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, 9.985, de 18 de julho de 2000, e 6.938, de 31 de agosto de 1981; e revoga dispositivos das Leis nºs 7.661, de 16 de maio de 1988, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 ago. 2025.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora nº 20 (NR-20): segurança e saúde no trabalho com inflamáveis e combustíveis. Brasília, DF, 2012.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora nº 9 (NR-9), Anexo 2: exposição ocupacional ao benzeno. Brasília, DF, 2016.

BUSETTO, L.; WICK, W.; GUMBINGER, C. How to use and assess qualitative research methods. *Neurological Research and Practice*, v. 2, n. 1, p. 14, 2020. DOI: https://doi.org/10.1186/s42466-020-00059-z.

DE FRANCESCHI, F. R.; DA COSTA, V. D. M.; LORENZETT, D. B.; NEUHAUS, M.; ROSSATO, M. V. Restritividade da legislação ambiental em postos de combustíveis. *Revista Monografias Ambientais*, p. 2062–2071, 2012. DOI: https://doi.org/10.5902/223613086092.

GODOY, A. S. Pesquisa qualitativa: tipos fundamentais. *Revista de Administração de Empresas*, v. 35, p. 20–29, 1995. DOI: https://doi.org/10.1590/s0034-75901995000300004.

OLIVEIRA, F. D.; DE BARROS, V. C. C.; BORGES, L. A. C.; JÚNIOR, J. E. V. C.; MARQUES, R. T. Impedimentos e motivações da descentralização do licenciamento ambiental em Minas Gerais. *Revista Espaço e Geografia*, v. 22, n. 2, 2020. Disponível em: https://periodicos.unb.br/index.php/sust/article/view/41539.

PARÁ (Estado). Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade. Instrução Normativa nº 11, de 12 de setembro de 2011. Estabelece diretrizes para o licenciamento ambiental de Posto Revendedor – PR, Posto de Abastecimento – PA, Instalações de Sistema Retalhista – ISR e Posto Flutuante – PF. Belém, PA, 2011.

SOUTO, C.; BARBOSA, K.; PENNER, G. C. Postos de revenda de combustíveis em Belém-PA: o licenciamento ambiental e os riscos à contaminação do solo e da água subterrânea. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 10, 2020. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.9100.

TOMASZEWSKI, L. E.; ZARESTKY, J.; GONZALEZ, E. Planning qualitative research: design and decision making for new researchers. *International Journal of Qualitative Methods*, v. 19, 2020. DOI: https://doi.org/10.1177/1609406920967174.

RECONFIGURAÇÃO TERRITORIAL A PARTIR DA LEI 12.678/2012 E OS DESAFIOS DE MOBILIDADE NA SEDE DE AVEIRO (PA)

1 Livia do Amaral Calixto, 2 Demétrio Santos Ribeiro Junior, 3 Rafael Pedroso Moura, 4 Layana Karla Araújo Figueira, 5 Alessandra Santos Mota

Universidade do Estado do Pará (UEPA), e-mail: liviaamaral455@gmail.com[1]; demetriojunior1984@gmail.com[2]; rafael.p.moura@aluno.uepa.br[3] *;layanekarla1990@gmail.com[4];* e-mail: alessandra.mota@uepa.br[5]

Palavras-chave: Unidade de Conservação; Mobilidade; Floresta Nacional do Tapajós

Resumo

Este estudo analisa os impactos da reconfiguração territorial da Floresta Nacional do Tapajós, estabelecida pela Lei nº 12.678/2012, sobre a mobilidade e a integração espacial da sede municipal de Aveiro (PA). A metodologia adotada consistiu em uma abordagem qualitativa exploratória, integrando levantamento normativo, análise do Plano de Manejo da FLONA Tapajós, diagnóstico socioeconômico com dados do IBGE e processamento de informações em ambiente SIG. Os resultados demonstram que, embora a desafetação da sede urbana tenha garantido autonomia jurídico-administrativa ao município, as barreiras físicas e logísticas persistem, mantendo uma condição de insularidade continental. A dependência do transporte fluvial, sujeita à sazonalidade hidrológica, compromete o acesso a serviços básicos de saúde e educação, eleva os custos logísticos e limita o desenvolvimento de atividades como o ecoturismo e o escoamento da produção agrícola familiar. Conclui-se que a autonomia formal foi insuficiente sem estratégias de infraestrutura integradas, sugerindo-se a implantação de uma Estrada-Parque como alternativa para conciliar a mobilidade populacional com a conservação ambiental na Amazônia.

Introdução

A Amazonia desempenha papel estratégico no equilíbrio ambiental global, sendo reconhecida por sua elevada biodiversidade e pela regulação de ciclos climáticos e hidrológicos essenciais (NOBRE *et al.,* 2016). Nesse contexto, a criação de Unidades de Conservação (UCs) e sua consolidação na região, tem sido consideradas instrumentos fundamentais de proteção ambiental. Embora, sua implementação tem sido, em muitos casos, marcada por tensões entre modelos preservacionistas e dinâmicas históricas de ocupação humana.

Em determinadas situações, a implementação dessas áreas tem se sobreposto a territórios previamente ocupados e socialmente consolidados, gerando conflitos socioespaciais e restrições ao acesso ao território e às estratégias de subsistência das populações locais (DIEGUES, 2001).

No contexto da gestão de unidades de conservação na Amazônia tem sido evidenciado a recorrente tensão entre os objetivos de conservação ambiental e a permanência de populações tradicionais, além do papel geopolítico dessas áreas no que tange as estratégias de ordenamento e ocupação territorial no Brasil (BECKER, 2005).

Na Amazonia oriental, especificamente no oeste do estado do Pará, a criação de unidades de conservação, durante a década de 1970, esteve associada à doutrina de segurança nacional, sintetizada no lema “Integrar para não entregar”, que visava assegurar a soberania territorial por meio da ocupação dirigida (BECKER, 2005). Nesse contexto, a Floresta Nacional do Tapajós foi instituída pelo Decreto n° 73.684/1974, abrangendo aproximadamente 600 mil hectares (BRASIL, 1974), incluindo a sede do município de Aveiro (PA).

A sobreposição administrativa resultante, transformou o núcleo urbano do município em um enclave sob jurisdição federal, submetido às normas do Sistema Nacional de Unidades de Conservação - SNUC (BRASIL, 2000), o que limitou a autonomia municipal por décadas. Com a promulgação da lei n° 12.678/2012, houve um marco na reconfiguração territorial de Aveiro, ao promover a desafetação de áreas consolidadas no município em relação à FLONA (BRASIL, 2012).

Contudo, a referida redefinição jurídico-territorial não logrou suprimir os obstáculos à integração espacial, configurando o fenômeno que Maria Geralda de Almeida (2013) designa como insularidade continental, ou seja, uma condição de isolamento territorial em área continental, decorrente da precariedade ou ausência de infraestrutura de acesso. Neste cenário, e apesar de sua autonomia jurídica, a sede do município de Aveiro mantém-se fisicamente isolada, com a acessibilidade exclusivamente dependente dos modais de transporte fluvial e aéreo. Tal situação acarreta o comprometimento do acesso a serviços essenciais, a elevação dos custos logísticos e a restrição do desenvolvimento socioeconômico local, perpetuando, assim, entraves à integração regional.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo analisar em que medida a reconfiguração territorial da Floresta nacional do Tapajós, promovida pela Lei n° 12.678/2012, foi capaz de alterar as condições de mobilidade e integração espacial do município de Aveiro (PA), avaliando seus efeitos socioeconômicos e propondo a implantação de uma Estrada - Parque como alternativa de integração territorial sustentável, com base em análise geoespacial e critérios ambientais, legais e socioeconômicos.

Material e Métodos

A presente pesquisa adota abordagem qualitativa de caráter exploratório, fundamentada nos referenciais do planejamento territorial e do licenciamento ambiental, aplicada ao município de Aveiro (PA). O estudo tem como foco a

reconfiguração territorial associada à FLONA Tapajós a partir da promulgação da Lei nº 12.678/2012. O delineamento metodológico foi estruturado em etapas sequenciais e integradas, iniciando-se com o levantamento normativo e cartográfico, com ênfase na análise técnica da referida lei em interface com o SNUC. Na etapa seguinte, procedeu-se à análise do Plano de Manejo da Floresta Nacional do Tapajós, incluindo seu Caderno de Mapas, elaborado pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) (2019), com o intuito de compreender o zoneamento ambiental da unidade e as diretrizes de uso e ocupação do território. Para complementar, realizou-se um diagnóstico socioeconômico com base em dados secundários do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), contemplando indicadores demográficos e produtivos. Também foram analisadas informações secundárias sobre infraestrutura de transporte, acessibilidade regional, sazonalidade hidrológica, serviços públicos e atividades econômicas locais, a fim de relacionar a reconfiguração jurídico territorial às condições concretas de mobilidade, integração espacial e desenvolvimento econômico do município.

Por fim, as informações foram integradas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), por meio do software QGIS, permitindo a análise espacial das relações entre limites territoriais, restrições ambientais e condições de acessibilidade, subsidiando a interpretação das dinâmicas de mobilidade e integração espacial do município no comparativo *a priori* e *a posteriori* à promulgação da referida lei.

Resultados e Discussão

A Lei nº 12.678, publicada em 2012, promoveu alterações nos limites de diferentes áreas federais protegidas na Amazônia, incluindo a Floresta Nacional de Itaituba I, a Floresta Nacional de Itaituba II, Área de Proteção Ambiental do Tapajós, e outras. No contexto da região do Tapajós, essa legislação representou um marco relevante na reorganização territorial, ao redefinir limites e estabelecer novos enquadramentos para áreas anteriormente inseridas em unidades de conservação.

No caso específico da Floresta Nacional do Tapajós, a referida lei atuou diretamente na desafetação de áreas consolidadas no município de Aveiro, incluindo a sede urbana e o entorno imediato. Essa alteração explicita nos artigos 16 a 19, que descrevem a exclusão da área localizada no município por meio de coordenadas geográficas. O Art. 19, por sua vez, estabeleceu as áreas que passaram a integrar a zona de amortecimento da unidade, excetuando a área urbana do município, o que consolidou sua retirada do território da unidade de conservação.

Embora a Lei nº 12.678/2012 tenha regularizado a situação jurídico territorial da sede municipal, a medida não estabeleceu mecanismos efetivos de integração física do município com a malha regional de transporte. Dessa forma, mesmo após a desafetação da área urbana, permanecem limitações estruturais de acesso, o que contribui para a manutenção de uma condição de insularidade continental, conforme definido por Almeida (2013), isto é, uma situação de isolamento territorial em pleno continente, associada à precariedade ou ausência de infraestrutura de acesso.

Nesse contexto, a promulgação da Lei nº 12.678/2012 possibilitou ao município de Aveiro recuperar maior autonomia jurídica de parte do seu território, mediante a desafetação de aproximadamente 5.861 hectares anteriormente inseridos nos limites da Floresta Nacional do Tapajós. Essa área corresponde à sede urbana e a parte de seu entorno rural, permitindo a reincorporação dessas áreas ao domínio municipal e ampliando as possibilidades de governança local sobre o uso e gestão do território. A fim de contextualizar espacialmente a área de estudo, a Figura 01 apresenta a localização da área desafetada da Floresta Nacional do Tapajós no município de Aveiro (PA), destacando sua relação territorial com a sede municipal e com o rio Tapajós, elementos fundamentais para a compreensão das condições de mobilidade, isolamento e integração espacial analisadas neste trabalho.

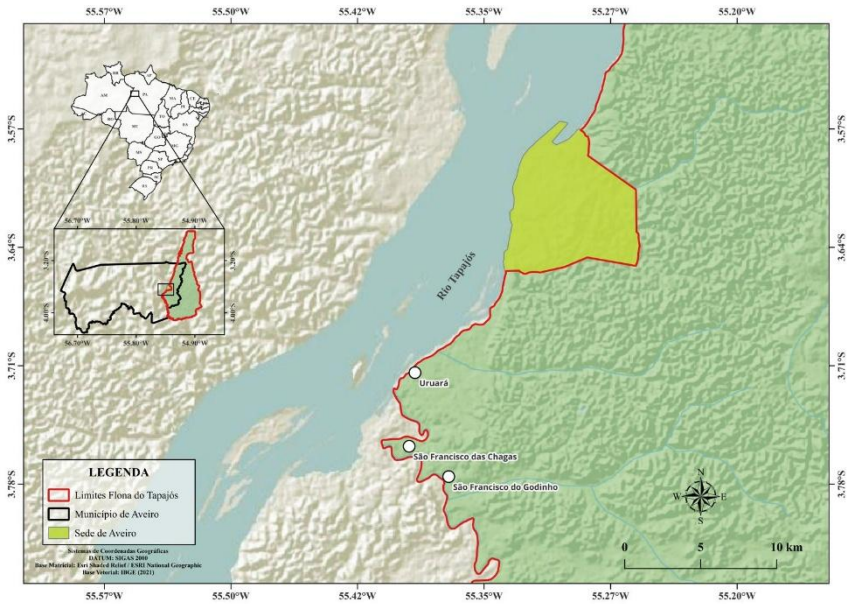


Figura 01: Localização da área desafetada da Floresta Nacional do Tapajós no município de Aveiro, Pará.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Essa permanência do isolamento evidencia o descompasso entre a autonomia jurídico administrativa conquistada e a integração territorial efetiva. A baixa densidade de infraestrutura viária, conforme evidenciado pelo estudo Regiões de Influência das Cidades (REGIC), do IBGE (2020), demonstra que o município de Aveiro apresenta forte dependência do transporte fluvial para sua articulação com centros regionais como Itaituba e Santarém. Essa condição resulta em maiores tempos de deslocamento e limita o acesso da população a serviços de saúde, educação superior, comércio especializado e demais funções urbanas de maior complexidade, reforçando o isolamento territorial e as desigualdades socioespaciais. Essa permanência do isolamento evidencia o descompasso entre a autonomia jurídico administrativa conquistada e a integração territorial efetiva. A baixa densidade de infraestrutura viária, conforme evidenciado pelo estudo Regiões de Influência das Cidades (REGIC), do IBGE (2018), demonstra que o município de Aveiro apresenta forte dependência do transporte fluvial para sua articulação com centros regionais como Itaituba e Santarém. Essa condição resulta em maiores tempos de deslocamento e limita o acesso da população a serviços de saúde, educação superior, comércio especializado e demais funções urbanas de maior complexidade, reforçando o isolamento territorial e as desigualdades socioespaciais.

A mobilidade em Aveiro é fortemente condicionada pela dinâmica hidroclimática da região amazônica, especialmente pela sazonalidade hidrológica dos rios, caracterizada pelos períodos de cheia e estiagem. Nessa configuração, os rios assumem papel central como eixos de circulação e integração territorial. Segundo a Agência Pará (2025), mais de 90% da população aveirense depende do transporte fluvial para se locomover, principalmente para acessar distritos, comunidades rurais e centros regionais como Itaituba e Santarém.

Apesar de sua centralidade para circulação regional, o transporte fluvial permanece sujeito às condições naturais dos rios e às limitações de infraestrutura de embarque e desembarque. Antes da implantação do Terminal Hidroviário de Aveiro, ocorrida em setembro de 2024, muitos moradores precisavam descer barrancos, enfrentar lama e areia para acessar as embarcações, o que comprometia a segurança e dificultava o deslocamento, especialmente de idosos e pessoas com mobilidade reduzida. Com a inauguração do terminal, houve melhoria nas condições de conforto, acessibilidade e segurança da população, além do fortalecimento do município como porta de entrada para visitantes e atividades econômicas locais (AGÊNCIA PARÁ, 2025).

Ainda assim, a implantação do terminal não eliminou os entraves estruturais associados à dependência do modal fluvial. Essa modalidade permanece condicionada à sazonalidade hidrológica, entendida como a variação periódica dos níveis dos rios ao longo do ano, com períodos de cheia e estiagem que influenciam diretamente as condições de navegação. No caso de Aveiro, o deslocamento até Itaituba pode variar entre 8 e 10 horas no período de cheia, alcançando cerca de 14 horas na estiagem, enquanto o trajeto até Santarém pode variar entre 12 e 14 horas, no período de cheia do rio, podendo chegar até 24 horas de duração, no período de estiagem, a partir da sede municipal.

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), a estiagem severa na Amazônia compromete significativamente a navegabilidade, exigindo intervenções como dragagens emergenciais para garantir o tráfego hidroviário e o abastecimento regional. Esse cenário evidencia como a sazonalidade hidrológica interfere diretamente na mobilidade, no acesso a serviços essenciais e na integração territorial do município, reforçando processos de isolamento socioespacial e vulnerabilidade regional.

Essa variabilidade no tempo de deslocamento evidencia a precariedade da mobilidade regional e o descompasso entre a autonomia jurídico-administrativa conquistada e a efetiva integração territorial. Assim o isolamento de Aveiro não deve ser compreendido apenas pela distância geográfica, mas também pela distância funcional, expressa pelo tempo de viagem, pelos custos de deslocamento, pela regularidade dos serviços e pela influência das condições ambientais sobre a navegabilidade.

No campo da educação, essas limitações tornam-se ainda mais evidentes, pois a rede de ensino de Aveiro é composta majoritariamente por escolas de ensino fundamental distribuídas em áreas rurais e ribeirinhas, enquanto a oferta de ensino médio permanece concentrada em poucas unidades localizadas na sede municipal. Dados do Censo Escolar 2024, divulgados pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira, mostram que a predominância da educação básica no município está vinculada ao ensino fundamental e à forte dispersão territorial das escolas, característica comum dos municípios amazônicos com ampla extensão rural e dependência do transporte fluvial (INEP, 2025; QEdu, 2025).

Essa distribuição espacial desigual implica que estudantes residentes em comunidades ao longo do rio Tapajós e de seus afluentes precisam percorrer longas distâncias, muitas vezes por meio de transporte fluvial, utilizando embarcações como barcos e lanchas escolares. OS tempos de deslocamento podem variar entre 1 e 4 horas por trajeto, podendo ser ampliados em períodos de estiagem. Essa dinâmica reforça que a acessibilidade territorial constitui fator determinante para a permanência escolar, uma vez que longos tempos de deslocamento e a irregularidade do transporte contribuem para a evasão escolar e aprofundam desigualdades socioespaciais no acesso à educação (ARROYO, 2012).

Além da educação, as limitações de mobilidade também repercutem no acesso aos serviços de saúde e em outras funções urbanas essenciais. A necessidade de deslocamentos longos custosos e sujeitos à variação das condições de navegabilidade amplia a vulnerabilidade da população local, especialmente em situações que exigem atendimento especializado ou deslocamentos frequentes para os centros regionais. Desse modo, a baixa conectividade territorial não afeta apenas a circulação física, mas também o exercício de direitos sociais básicos.

O isolamento territorial também compromete o desenvolvimento de atividades econômicas sustentáveis, como o ecoturismo. A Floresta Nacional do Tapajós é uma das unidades de conservação mais visitadas da Região Norte do Brasil; contudo, as condições de acesso e a infraestrutura local são apontadas como importantes entraves à ampliação do fluxo de visitantes. Segundo Figueira et al. (2023), a dificuldade de acesso terrestre à sede do município de Aveiro limita o fluxo turístico e eleva os custos logísticos, reduzindo a atratividade da região, apesar de seu elevado potencial ambiental e paisagístico associado à Floresta Nacional do Tapajós.

Na região amazônica, os rios desempenham papel central como eixos de circulação, sendo responsáveis pela conexão entre municípios e comunidades isoladas (BRASIL, 2018). No entanto, essa dependência implica custos operacionais elevados, especialmente relacionados ao consumo de combustível e à manutenção das embarcações, que podem representar parcela significativa dos custos totais do transporte (ANTAQ, 2018). Além disso, o transporte fluvial apresenta limitações estruturais, como a precariedade da infraestrutura portuária e a irregularidade dos serviços, fatores que encarecem o deslocamento de pessoas e mercadorias e reduzem a eficiência logística (LACERDA; SITUBA, 2020). Dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) indicam que o transporte fluvial na Amazônia é amplamente utilizado por populações de baixa renda, o que evidencia o peso relativo dos custos de transporte no orçamento das famílias (ANTAQ, 2018).

Nesse contexto, o acesso à região depende da combinação de transporte aéreo até centros de Santarém e Itaituba, seguido de deslocamento fluvial até Aveiro. Santarém se destaca como principal polo regional, com maior oferta de voos regulares operados por companhias áreas como Azul, Gol e Latam (ANAC, 2023; AENA, 2023), enquanto Itaituba apresenta estrutura mais limitada e menor frequência de conexões (BRASIL, 2017). Essa concentração da infraestrutura aeroportuária em poucos núcleos regionais implica significadamente no custo total da viagem e reduz a competitividade do destino turístico, especialmente quando associada à necessidade de longos deslocamentos hidroviários e à imprevisibilidade provocada pela sazonalidade hidrológica (ANTAQ, 2018; LACERDA; SITUBA, 2020).

Ademais, a infraestrutura local ainda se mostra incipiente, caracterizada pelo reduzido número de meios de hospedagem, pela limitada oferta de serviços turísticos especializados e pelas dificuldades logísticas de abastecimento, diretamente relacionadas às restrições de acesso (IBGE, 2022). Como resultado, observa-se uma disparidade entre o elevado potencial ambiental e paisagístico da região, especialmente no contexto da FLONA Tapajós, e a efetiva capacidade de atração e permanência dos visitantes. A precariedade da mobilidade e da infraestrutura não apenas limita o fluxo turístico, mas também compromete a viabilidade econômica do ecoturismo, evidenciando que a acessibilidade territorial constitui fator decisivo para a consolidação de atividades sustentáveis em áreas protegidas (BUARQUE, 2008).

Esses entraves logísticos também repercutem sobre o custo de vida da população residente e sobre as formas de escoamento da produção agrícola. No Brasil, as desigualdades territoriais configuram elemento central para compreensão das barreiras ao desenvolvimento econômico, sobretudo em regiões periféricas e de baixa integração logística. NA Amazônia, esse cenário é particularmente evidente, pois o isolamento territorial, associado à precariedade de infraestrutura de transporte, encarece insumos, dificulta o acesso a mercados consumidores e amplia a dependência de vias fluviais e rodovias incompletas (IBGE, 2022).

No contexto da região do Rio Tapajós, essa problemática assume maior complexidade em função da combinação entre isolamento geográfico, predominância de populações tradicionais e forte presença de áreas protegidas. A base produtiva local de Aveiro está estruturada principalmente na agricultura familiar e no extrativismo, com destaque para o cultivo de mandioca, milho e feijão, além da produção de frutas regionais e da extração de produtos florestais não madeireiros, como castanha, açaí e óleos vegetais. Essas atividades constituem importante fonte de subsistência e geração de renda para as populações rurais e ribeirinhas, mantendo forte relação com o uso tradicional dos recursos naturais e com a dinâmica socioeconômica da região (IBGE, 2020; EMATER-PA, 2022).

Segundo estudos do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), a mandioca constitui o principal cultivo agrícola da região amazônica, sendo base alimentar e econômica das comunidades locais, manejada em sistemas tradicionais influenciados por fatores ambientais e culturais (CHAVES, 2016). Esse padrão produtivo está associado ao uso de técnicas como o sistema de corte e queima, característico da agricultura itinerante, que embora adaptado às condições locais, apresenta limitações em termos de produtividade e sustentabilidade (ICMBio, 2014).

De acordo com o IBGE, a produção agrícola brasileira abrange uma ampla diversidade de culturas temporárias e permanentes, incluindo mandioca, milho, feijão, banana e cacau, sendo monitorada por meio de indicadores como área plantada, produção e rendimento médio (IBGE, 2023). No entanto, na região amazônica, especialmente no Tapajós, essa diversidade produtiva não se traduz necessariamente em dinamismo econômico, devido à baixa inserção em cadeias produtivas estruturadas e à limitada presença de agroindústrias.

A estrutura econômica local permanece fortemente baseada no setor primário, com reduzido nível de industrialização. A ausência de agroindústrias limita a agregação de valor aos produtos, fazendo com que grande parte da produção seja comercializada *in natura*, o que reduz a renda dos produtores e reforça a dependência de intermediários (MAPA, 2021). Iniciativas pontuais, como projetos de fortalecimento da cadeia produtiva da mandioca, demonstram potencial de melhoria por meio da assistência técnica e da organização produtiva, mas ainda são insuficientes para promover mudanças estruturais (SEMAB, 2025).

Entre os principais entraves à expansão agropecuária em Aveiro destacam-se a deficiência de infraestrutura logística, o acesso limitado ao crédito rural e à assistência técnica, além da insegurança fundiária e dos conflitos pelo uso da terra. Esses fatores restringem a ampliação da produção, dificultam o escoamento da produção agrícola e comprometem a sustentabilidade econômica das atividades rurais, especialmente no contexto da agricultura familiar e das comunidades tradicionais (IBGE, 2020; INCRA, 2021; EMATER-PA, 2022).

Ademais, a expansão agropecuária enfrenta restrições adicionais decorrentes da presença de Unidades de Conservação, que ocupam extensas áreas do território. Essas unidades são regulamentadas pelo SNUC e permitem o uso sustentável dos recursos naturais, desde que respeitadas normas específicas de manejo e conservação (MMA, 2020). Embora importantes para a preservação ambiental, as regras de uso da terra limitam a expansão agropecuária convencional e exigem práticas produtivas compatíveis com os objetivos de conservação.

Dessa forma, o isolamento territorial, associado à baixa infraestrutura, à limitada industrialização e às restrições legais de uso da terra, contribui para o aumento do custo de vida e para a limitação do escoamento da produção agrícola. Esse conjunto de fatores evidencia a necessidade de políticas públicas integradas que promovam o desenvolvimento regional sustentável, conciliando conservação ambiental com inclusão produtiva e fortalecimento das cadeias econômicas locais.

Com isso, depreende-se que a persistência de limitações geográficas, expressas pela precariedade da infraestrutura de transporte e pela forte dependência da navegação fluvial, tem restringido o desenvolvimento territorial de Aveiro.

Embora a Lei nº 12.678/2012 tenha representado avanço relevante no reconhecimento jurídico administrativo da sede municipal, seus efeitos não foram suficientes para superar os entraves estruturais de mobilidade e integração espacial. Assim, permanece um descompasso entre a autonomia formal conquistada e a integração territorial efetiva, reforçando a condição de insularidade continental como chave interpretativa para compreender os desafios socioeconômicos do município.

Esses fatores reforçam a necessidade de soluções de infraestrutura territorialmente planejadas, capazes de conciliar integração espacial, mobilidade da população e conservação ambiental. Nesse contexto, a implantação de uma Estrada-Parque pode ser vista como possibilidade a ser analisada em estudos futuros, por seu potencial de compatibilizar o direito à mobilidade com a proteção dos ecossistemas, especialmente em territórios sob influência de unidades de conservação.

Considerações Finais

A análise com base no estudo feito, evidencia que a reconfiguração territorial da Floresta Nacional do Tapajós, promovida pela Lei nº12.678/2012, representou um avanço no reconhecimento jurídico administrativo da sede municipal de Aveiro e na tentativa de compatibilizar conservação ambiental e ocupação humana consolidada. No entanto, os resultados indicam que essa medida foi insuficiente para superar os desafios estruturais de mobilidade e integração especial que historicamente condicionam o município.

A autonomia territorial conquistada a partir de 2012 não se converteu plenamente em efetividade social e territorial, uma vez que a dependência do transporte fluvial, a sazonalidade hidrológica e a precariedade de acesso terrestre contínuo permanecem limitando o acesso a serviços essenciais, como saúde e educação, além de restringirem o desenvolvimento econômico, o escoamento da produção local e a integração territorial com centros regionais.

Nesse sentido, a condição de insularidade continental permanece como elemento central para compreender os desafios enfrentados por Aveiro. Embora a desafetação da sede urbana tenha reduzido a sobreposição direta entre o núcleo municipal e os limites da unidade de conservação, ela não extinguiu as barreiras físicas, logísticas e institucionais que entravam a integração territorial efetiva do município.

Os resultados observados também demonstram que a baixa conectividade territorial repercute sobre diferentes dimensões da vida local, afetando a mobilidade cotidiana, o custo de vida, o acesso a políticas públicas, a organização produtiva e o aproveitamento de atividades econômicas compatíveis com a conservação ambiental, como o turismo e o extrativismo sustentável. Dessa forma, a reconfiguração jurídico-territorial ocorrida a partir de 2012, deve ser compreendida como uma etapa importante, mas não suficiente, para a promoção do desenvolvimento regional sustentável.

Conclui-se que a complexidade da gestão territorial analisada no caso de Aveiro, evidencia a necessidade de maior integração entre políticas ambientais, planejamento territorial e infraestrutura de mobilidade na Amazônia. A conservação ambiental, para ser socialmente efetiva, precisa dialogar com as condições concretas de permanência, circulação e reprodução socioeconômica das populações locais residentes. Dentre as possibilidades possíveis de serem aplicadas à este contexto, sugere-se a implantação de uma Estrada-Parque a ser considerada como alternativa potencial, desde que fundamentada em critérios técnicos, legais, socioambientais e na participação das populações locais.

Busca-se, portanto, que este estudo contribua para o debate sobre os limites da reconfiguração territorial em unidades de conservação quando esta não é acompanhada por estratégias capazes de promover acessibilidade, inclusão produtiva e integração regional, visando assistir populações ocupadas por áreas já consolidadas.

Agradecimentos

Manifestamos nossa profunda gratidão a Deus pela vida, pela saúde e por ter provido as condições que tornaram este trabalho possível. Estendemos nossos agradecimentos às nossas famílias, pelo suporte incondicional estímulo constante e compreensão demonstrada ao longo de todo o percurso de construção deste estudo. À Universidade do Estado do Pará (UEPA), expressamos nosso reconhecimento pelo fundamental apoio institucional e pelas inúmeras oportunidades que nos são oferecidas no decorrer da nossa formação. Somos imensamente gratos à professora Mestre Alessandra Santos Mota, por sua valiosa e atenciosa orientação, pelas contribuições técnicas essenciais e pelo dedicado acompanhamento em todas as etapas da elaboração deste trabalho. Agradecemos também o apoio da Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas – FAPESPA, por meio da concessão de bolsa de Iniciação Científica no âmbito do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica na modalidade PIBIC-FAPESPA/FORMA PARÁ, vinculado à Universidade do Estado do Pará – UEPA, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós- Graduação – PROPESP, Edital nº 103/2025 – UEPA. Por último, mas não menos importante, agradecemos sinceramente a todos aqueles que, seja de forma direta ou indireta, colaboraram para a efetivação desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA PARÁ. Terminal hidroviário de Aveiro facilita acesso ao município e aumenta expectativa de turismo na região. 2025. Disponível em: https://agenciapara.com.br/noticia/60266. Acesso em: 30 abr. 2026.

AGÊNCIA PARÁ. Informações sobre mobilidade fluvial e deslocamentos intermunicipais no oeste do Pará. Governo do Estado do Pará, 2025.

AENA BRASIL. Informações operacionais de aeroportos no Brasil. 2023.

ALMEIDA, Maria Geralda de. *Territórios e territorialidades: das categorias à prática*. Goiânia: Editora UFG, 2013

ANTAQ – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. *Caracterização da oferta e da demanda do transporte fluvial de passageiros e cargas na Região Amazônica*. Brasília, 2018.

ANAC – AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Dados do transporte aéreo brasileiro. Brasília, 2023.

ARROYO, Miguel G. *Educação do campo: notas para uma análise de percurso*. Petrópolis: Vozes, 2012.

BECKER, Bertha K. Geopolítica da Amazônia. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 19, n. 53, p. 71–86, 2005.

BRASIL. Decreto nº 73.684, de 19 de fevereiro de 1974. Cria a Floresta Nacional do Tapajós. Brasília, DF, 1974.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC). Brasília: Presidência da República, 2000.

BRASIL. Lei nº 12.678, de 25 de junho de 2012. Altera os limites dos Parques Nacionais da Amazônia, do Rio Novo e da Serra do Pardo e da Floresta Nacional do Tapajós. Brasília: Presidência da República, 2012.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Transporte fluvial garante o deslocamento de pessoas e cargas na região amazônica. Brasília, 2018.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Infraestrutura aeroportuária regional: relatório técnico. Brasília, 2017.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Cadeias produtivas e agregação de valor. Brasília, 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC). Brasília: MMA, 2020.

BUARQUE, Sérgio C. *Construindo o desenvolvimento local sustentável*. Rio de Janeiro: Garamond, 2008.

CHAVES, Raquel Sousa. *Tipos de solo e a orientação para o mercado influenciam na escolha das variedades de mandioca (Manihot esculenta Crantz) nos sistemas de produção do Baixo Rio Tapajós, Pará*. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), 2016. Dissertação (Mestrado em Botânica).

DIEGUES, Antonio Carlos. *O mito da natureza intocada*. 4. ed. São Paulo: Hucitec, 2001.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT realiza visitas técnicas para garantir a navegabilidade em períodos de estiagem. Brasília, 2024.

EMATER-PA – EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO ESTADO DO PARÁ. Relatório de atividades produtivas e agricultura familiar no oeste do Pará. Belém, 2022.

FIGUEIRA, Layana Karla Araújo et al. Estudos sobre ecoturismo e acessibilidade na Floresta Nacional do Tapajós. 2023.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e Estados: Aveiro (PA). Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br. Acesso em: 14 abr. 2026.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Regiões de Influência das Cidades – REGIC 2018*. Rio de Janeiro, 2020.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção Agrícola Municipal. Rio de Janeiro, 2023.

ICMBio – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Relatórios técnicos e manejo territorial da FLONA Tapajós. Brasília, 2014.

ICMBio – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. *Plano de Manejo da Floresta Nacional do Tapajós*. Brasília, 2019.

INCRA – INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. Relatório sobre regularização fundiária e conflitos agrários na Amazônia Legal. Brasília, 2021.

INEP – INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA. *Censo Escolar da Educação Básica 2023*. Brasília: MEC/INEP, 2023.

LACERDA, Klintia Costa; SITUBA, Nágila dos Santos. Transporte fluvial e aéreo na Amazônia Legal: um estudo de caso no município de Eirunepé (AM). *Geografia (Londrina)*, 2020.

NOBRE, Carlos A. et al. *Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm*. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), v. 113, n. 39, 2016.

QEDU. Indicadores educacionais do município de Aveiro (PA). 2025.

SEMAB – SECRETARIA MUNICIPAL DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO. Relatórios de produção agrícola. 2025.

ANÁLISE COMPARATIVA DAS NARRATIVAS SOCIAIS E INSTITUCIONAIS SOBRE IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS DA BARRAGEM DE FRONTEIRAS, EM CRATEÚS-CE

1 Thaiara Basílio de Melo Gonçalves, 2 Maressa Oliveira Martins, 3 Karina Albuquerque da Silva, 4 Luana Viana Costa e Silva

[1]Universidade Federal do Ceará, eng.amb.thaiarabasilio@gmail.com ; [2] Universidade Federal do Ceará, maressamartins47@gmail.com ;[3] Universidade Federal do Ceará, karinalbuquerque.ufc@gmail.com [4]Universidade Federal do Ceará - Campus Crateús, luanaviana@crateus.ufc.br

Palavras-chave: Estudo de Impacto Ambiental; Justiça Ambiental; Metodologias Participativas.

Resumo

A construção de barragens no semiárido brasileiro insere-se em uma trajetória histórica marcada por políticas públicas orientadas pelo ideário do "combate à seca", frequentemente associadas a soluções técnico-infraestruturais de grande escala. Embora apresentadas como promotoras de segurança hídrica e desenvolvimento regional, tais intervenções operam por meio de processos seletivos de apropriação territorial, que tendem a distribuir de forma desigual os custos e benefícios socioambientais. Nesse contexto, a Barragem de Fronteiras, no município de Crateús (CE), evidencia dinâmicas de desterritorialização que afetam não apenas a dimensão física da terra, mas também os modos de vida e as relações sociais das populações atingidas. O presente estudo teve como objetivo analisar comparativamente as narrativas institucionais e comunitárias sobre os impactos socioambientais associados ao empreendimento, evidenciando disputas em torno de sua definição e legitimação. Adotou-se uma abordagem qualitativa, de caráter exploratório, baseada na análise documental de instrumentos do licenciamento ambiental, especialmente o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), articulada à realização de entrevista semiestruturadas guiada com moradora do Assentamento Palmares II, vinculada ao Movimento dos Atingidos por Barragens de Crateús (MABC). Os resultados apontaram para a existência de racionalidades distintas na compreensão dos impactos socioambientais. No âmbito institucional, prevalece uma abordagem baseada em indicadores quantitativos e recortes analíticos que privilegiam dimensões físico-bióticas, conferindo ao empreendimento uma aparência de neutralidade e redentora do social. Em contraposição, as narrativas comunitárias evidenciam uma compreensão ampliada dos impactos, incorporando dimensões sociais, políticas e subjetivas ausentes ou subdimensionadas nos estudos ambientais. A análise permitiu identificar elementos centrais da experiência vivida no território, como a vivência de um "tempo suspenso", o sofrimento psicossocial, conflitos internos nas comunidades, assimetria no acesso à informação, percepção de injustiça nos processos indenizatórios, distanciamento entre medidas previstas e executadas, exclusão nos processos decisórios e desconsideração dos saberes locais. Esses achados evidenciam que os instrumentos de avaliação ambiental operam por meio de recortes que limitam a compreensão da complexidade dos impactos socioambientais, ao privilegiar abordagens padronizadas em detrimento das experiências situadas. Assim, a disputa em torno dos impactos envolve não apenas sua identificação, mas também os critérios que definem o que pode ser reconhecido como impacto, configurando um embate de natureza material e epistemológica. Dessa forma, o estudo aponta para a necessidade de revisão dos modelos tradicionais de avaliação ambiental, com ênfase na incorporação de abordagens mais sensíveis às realidades territoriais e às múltiplas formas de produção de conhecimento, contribuindo para processos de licenciamento mais inclusivos e socialmente justos.

Introdução

A construção de barragens no semiárido brasileiro tem sido historicamente legitimada por uma narrativa desenvolvimentista ancorada no ideário do "combate à seca", constituindo-se como eixo estruturante das políticas públicas voltadas à região desde o início do século XX. Contudo, tal racionalidade não pode ser compreendida de forma descolada das relações de poder que a sustentam, uma vez que, como argumenta Acselrad (2004), os processos de apropriação territorial no âmbito do desenvolvimento não são neutros, mas profundamente seletivos, operando por meio da distribuição desigual dos custos e benefícios ambientais.

Nesse sentido, a chamada "indústria da seca" não se limita a um fenômeno histórico, mas configura-se como uma racionalidade político-institucional persistente, na qual a escassez hídrica é mobilizada como dispositivo de legitimação para grandes empreendimentos hidráulicos, reforçando um modelo centralizador de gestão dos recursos naturais (Castro, 1992; Silva, 2003). Tal modelo privilegia soluções técnico-infraestruturais de larga escala, frequentemente em detrimento de alternativas descentralizadas e socialmente mais justas, contribuindo para a reprodução de desigualdades territoriais. A promessa de progresso associada a esses empreendimentos, expressa em termos como segurança hídrica, desenvolvimento regional e modernização, contrasta de maneira contundente com as dinâmicas concretas vivenciadas pelas populações atingidas.

No caso da Barragem de Fronteiras, no município de Crateús (CE), observa-se a materialização de processos de desterritorialização que, conforme Haesbaert (2004), implicam não apenas a perda física da terra, mas a ruptura de múltiplas territorialidades, incluindo dimensões simbólicas, culturais e afetivas que estruturam o pertencimento. Mais do que intervenções técnicas sobre o espaço, tais empreendimentos operam como dispositivos de poder que produzem redefinições territoriais orientadas por decisões políticas e institucionais, nas quais se estabelece uma hierarquização de interesses (Zhouri; Laschefski, 2010). Nesse

processo, determinados usos do território, associados à lógica estatal e ao capital, são privilegiados, enquanto outros, vinculados às formas de vida das comunidades locais, são sistematicamente deslegitimados ou invisibilizados. Essa dinâmica pode ser interpretada à luz da noção de violência epistêmica proposta por Spivak (1988), na medida em que os instrumentos técnico-burocráticos, como o EIA e o RIMA, não apenas descrevem os impactos, mas delimitam previamente o que pode ser reconhecido como tal. Ao traduzirem experiências complexas em categorias quantificáveis, esses dispositivos produzem uma redução ontológica do território, convertendo-o em objeto de gestão e apagando suas dimensões vividas.

Dessa forma, os impactos socioambientais associados à construção de barragens ultrapassam o tecnicismo que tradicionalmente orienta o licenciamento ambiental. Eles incidem diretamente sobre identidades, memórias e modos de vida, configurando aquilo que Zhouri (2012) denomina como conflitos ambientais de base territorial, nos quais está em jogo não apenas a distribuição de recursos, mas o reconhecimento de diferentes racionalidades e formas de existência. Assim, compreender a Barragem de Fronteiras exige reconhecer que o conflito instaurado não se restringe à materialidade da obra, mas constitui uma disputa mais ampla pelo direito de definir o território, isto é, pelo poder de narrar, classificar e legitimar o que conta como impacto, desenvolvimento e justiça. Trata-se, portanto, de um embate simultaneamente material e epistemológico, no qual se confrontam projetos distintos de sociedade e de futuro.

Material e Métodos

A presente pesquisa caracteriza-se como qualitativa, de natureza exploratória e interpretativa, adotando uma abordagem participativa fundamentada nos princípios da pesquisa-ação, a qual pressupõe a construção do conhecimento em interação com os sujeitos envolvidos, reconhecendo-os como agentes ativos no processo investigativo (Michel Thiollent, 2011). O estudo foi desenvolvido no município de Crateús, semiárido cearense, no contexto da construção da Barragem de Fronteiras, com foco no Assentamento Palmares II , diretamente afetado pelo empreendimento (Figura 01).

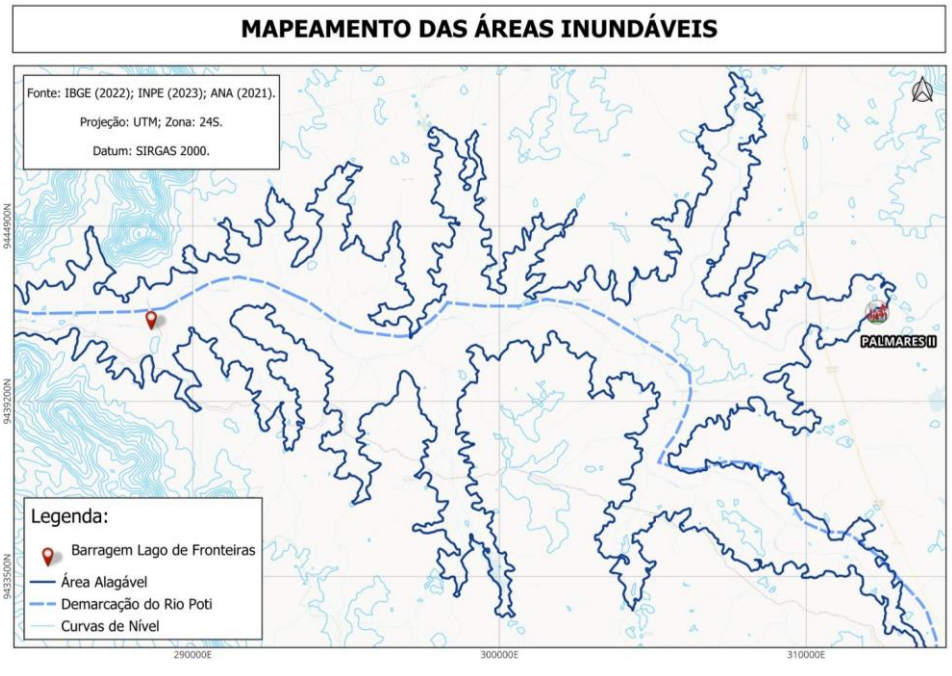


Figura 01: Assentamento Palmares II com previsão inundável.
Fonte: Martins. M.O.; Basílio. T.M.G. (2026)

Os procedimentos metodológicos foram conduzidos de forma integrada, iniciando-se com a análise documental de relatórios técnicos e normativos do empreendimento, com destaque para o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), além de documentos institucionais elaborados pelos órgãos públicos. Essa etapa buscou compreender como os impactos socioambientais são definidos e legitimados no âmbito institucional, considerando-se que tais documentos não apenas descrevem a realidade, mas também participam ativamente de sua construção discursiva (Zhouri; Laschefski, 2010).

Como estratégia de apreensão das perspectivas dos sujeitos e de sua articulação com dimensões visuais da experiência territorial, foram desenvolvidas, de forma paralela, atividades de formação e produção audiovisual participativa, direcionadas à equipe envolvida na pesquisa. Tal abordagem fundamenta-se nos princípios da comunicação popular e comunitária, que compreendem os processos comunicacionais como espaços de disputa simbólica e de produção de sentidos, nos quais os sujeitos deixam de ocupar a posição de meros informantes para se constituírem como agentes ativos na construção narrativa de suas realidades (Peruzzo, 2009). Conforme argumenta Peruzzo (2009), a comunicação comunitária desempenha um papel central na democratização da produção de sentidos, ao possibilitar a emergência de vozes historicamente marginalizadas e a construção de discursos contra-hegemônicos.

No âmbito das estratégias de produção audiovisual participativa, a coleta de dados empíricos incorporou a realização de uma entrevista guiada, concebida não apenas como instrumento de obtenção de informações, mas como prática dialógica de construção de narrativas situadas, onde o conhecimento não é produzido a partir de uma posição neutra ou universal, mas a partir de localizações específicas, historicamente situadas e corporificadas (Haraway, 1988). Por se tratar de um estudo exploratório, a entrevista não teve como objetivo representar a totalidade das populações atingidas, mas aprofundar uma narrativa situada e emblemática sobre os impactos socioambientais vivenciados no território. Nesse contexto, foi conduzida entrevista com a representante do Movimento dos Atingidos por Barragens de Crateús (MABC), moradora do Assentamento Palmares II.

A entrevista foi orientada por roteiro semiestruturado, composto por questões previamente definidas (Quadro 01), voltadas à noção de impacto socioambiental, à identificação das transformações vivenciadas no território e à reflexão crítica acerca dos processos institucionais de definição e legitimação desses impactos.

Quando dizem “impacto socioambiental”, o que significa pra você?
Quem define o que é um impacto?
O que vocês descobriram sobre o próprio território nesse processo?
O que a ciência ainda não sabe escutar?

Quadro 01:Perguntas da entrevista guiada.
Fonte: Autoria Própria (2025)

Os dados obtidos foram analisados a partir de uma abordagem interpretativa. As informações foram organizadas por eixos temáticos, definidos a partir da recorrência dos sentidos presentes na narrativa e de sua articulação com o referencial teórico adotado. Esses eixos contemplam dimensões como desterritorialização, sofrimento social, resistência simbólica e disputa epistemológica. A interpretação foi orientada por um referencial teórico crítico que articula os conceitos de violência epistêmica, justiça ambiental e contra-conduta, conforme formulados por Spivak (1988), Acselrad (2004) e Foucault (2008), respectivamente. Tal articulação buscou compreender os impactos socioambientais como processos que definem quais experiências são reconhecidas, quais vozes são legitimadas e quais saberes são sistematicamente silenciados.

Resultados e Discussão

A análise comparativa entre as narrativas institucionais e comunitárias acerca do Lago de Fronteiras evidencia a existência de uma disputa epistemológica em torno da definição e legitimação dos impactos socioambientais. Essa disputa não se limita a diferenças de percepção, mas expressa a coexistência de racionalidades distintas, atravessadas por relações de poder que condicionam quais formas de conhecimento são reconhecidas como válidas.

No âmbito institucional, os documentos analisados, especialmente o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), estruturam-se a partir de uma lógica técnico-instrumental, baseada em indicadores quantificáveis, como área inundada, quantificação da média de famílias atingidas e parâmetros físico-bióticos. Nos documentos institucionais analisados, observa-se a predominância de categorias voltadas à mensuração de área afetada, reassentamento, supressão vegetal, fauna, flora e compensações previstas, enquanto dimensões como sofrimento psicossocial, incerteza prolongada e fragmentação comunitária não aparecem como impactos autônomos.

Em contraposição, as narrativas comunitárias revelam uma compreensão ampliada dos impactos socioambientais, incorporando dimensões frequentemente ausentes nos estudos institucionais. Os relatos evidenciam o território como espaço vivido, marcado por vínculos afetivos, práticas produtivas, memórias coletivas e relações de pertencimento. Nessa perspectiva, o impacto socioambiental é entendido como uma realidade concreta que afeta simultaneamente o meio ambiente e as condições de vida.

No plano social, manifesta-se pela paralisação do cotidiano, evidenciada na impossibilidade de reformar moradias, investir na produção agrícola ou acessar políticas públicas, o que gera insegurança, sofrimento psicológico, adoecimento e conflitos internos, destaca-se a alteração do curso natural do rio, o desmatamento, a perda de biodiversidade e a consequente desestruturação dos ecossistemas locais. No plano político, a entrevistada aponta para uma relação desigual de poder, na qual a narrativa comunitária sugere que os atingidos se percebem como obstáculos ao empreendimento, submetidos a pressões institucionais e a processos indenizatórios considerados injustos, marcados pela ausência de informação e apoio técnico. Assim, o impacto emerge como um processo abrangente de desestruturação territorial, social e ambiental, ancorado na experiência vivida.

No que se refere à definição dos impactos, observa-se a percepção de que esse processo está concentrado nas instâncias institucionais responsáveis pelo empreendimento, ocorrendo de forma unilateral e sem a participação efetiva das comunidades diretamente afetadas. Evidenciam-se desconfianças quanto à veracidade das informações produzidas, especialmente em relação à identificação dos atingidos, bem como críticas à ausência de acesso aos estudos ambientais e ao não cumprimento das medidas neles previstas. Tal dinâmica reforça a ideia de que os impactos são definidos externamente ao território, distanciando-se das experiências concretas vivenciadas localmente.

O processo também possibilitou o aprofundamento do reconhecimento sobre o próprio território, destacando suas potencialidades e especificidades. Ressalta-se a qualidade das terras, sobretudo nas áreas próximas ao rio, consideradas altamente produtivas, bem como a disponibilidade hídrica, com a presença de fontes perenes que garantem o abastecimento ao longo do tempo. Para além dos aspectos físicos, o território é afirmado como espaço de construção coletiva, marcado por relações de vizinhança,

organização social e uma trajetória histórica de luta vinculada à formação do assentamento. Nesse contexto, a permanência no território assume não apenas um caráter material, mas também simbólico, relacionado ao pertencimento e à continuidade dos modos de vida.

Por fim, evidencia-se uma crítica à limitação da ciência institucional em reconhecer e incorporar os saberes produzidos pelas comunidades. O conhecimento local, construído a partir da experiência cotidiana com a terra, a água e a produção, aparece como elemento central para a compreensão das dinâmicas territoriais, muitas vezes superando o entendimento de agentes externos. No entanto, tais saberes são frequentemente desconsiderados nos estudos técnicos, revelando uma hierarquização do conhecimento que privilegia abordagens formais em detrimento das epistemologias situadas. Essa limitação aponta para uma escuta restrita por parte da ciência, incapaz de apreender plenamente a complexidade dos impactos socioambientais a partir das experiências vividas no território.

A partir da análise das narrativas produzidas na entrevista, foi possível identificar um conjunto de dimensões que expressam aspectos centrais da experiência dos impactos socioambientais no território, mas que não se encontram devidamente contemplados nos instrumentos institucionais de avaliação. Nesse sentido, a sistematização do Quadro 02 apresenta os principais elementos evidenciados na narrativa analisada, bem como sua relação com o tratamento conferido nos estudos ambientais do empreendimento, permitindo explicitar as divergências entre o impacto formalmente descrito e aquele efetivamente vivenciado.

Dimensão	Elemento Evidenciado	Descrição (Entrevista)	Tratamento nos EIA/RIMA
Temporalidade do impacto	Tempo suspenso	Vivência prolongada de incerteza, sem possibilidade de planejar o futuro ou tomar decisões sobre o território.	Não contemplado; os estudos operam com recortes temporais definidos e não captam efeitos prolongados de espera e indefinição.
Saúde e subjetividade	Sofrimento psicossocial	Presença de adoecimento mental e emocional decorrente da pressão, insegurança e prolongamento do processo.	Subdimensionado ou ausente; prioriza-se a dimensão da saúde física, sem aprofundamento nos aspectos psicossociais.
Dinâmica comunitária	Conflitos internos	Tensões e divisões dentro da própria comunidade, associadas à demora e às incertezas do processo.	Não contemplado; os impactos sociais são tratados de forma agregada, sem considerar dinâmicas internas das comunidades.
Acesso à informação	Assimetria informacional	Dificuldade de acesso aos documentos, falta de clareza e compreensão sobre o processo.	Não abordado como impacto; restringe-se à previsão formal de divulgação das informações.
Capacidade de defesa	Ausência de assessoria técnica/jurídica	Falta de apoio especializado para compreender direitos e negociar condições.	Não contemplado; não há avaliação da capacidade técnica ou jurídica das populações atingidas.
Processo indenizatório	Percepção de injustiça	Valores considerados baixos e aceitação forçada diante da falta de alternativas.	Tratado de forma normativa, com definição de diretrizes gerais, sem incorporação das percepções e conflitos associados ao processo indenizatório.
Execução das medidas	Não cumprimento do EIA/RIMA	Distanciamento entre o que está previsto nos estudos e o que é efetivamente realizado.	Não avaliado; os estudos se limitam à proposição de medidas, sem considerar sua efetiva implementação no território.
Participação social	Exclusão decisória	Ausência das comunidades nos processos de definição dos impactos e decisões sobre o território.	Formalmente previsto, porém restrito a etapas consultivas, sem incorporação substantiva das contribuições das comunidades.
Saberes locais	Conhecimento territorial não incorporado	Saber empírico sobre solo, água e produção é desconsiderado nos estudos.	Não integrado; prevalece o conhecimento técnico-científico padronizado em detrimento dos saberes locais.
Dimensão ecológica ampliada	Perda não mensurada da fauna	Percepção de impactos sobre a fauna que não são quantificados ou considerados adequadamente.	Parcialmente contemplado; limitado a levantamentos técnicos que não captam perdas indiretas ou não mensuráveis.

Quadro 02: Elementos complementares da narrativa comunitária não contemplados nos instrumentos institucionais. Fonte: Autoria própria com base na análise do EIA do empreendimento e na entrevista com a moradora (2026).

A análise desses elementos evidencia que os instrumentos de avaliação ambiental operam por meio de recortes que limitam a compreensão da complexidade dos impactos socioambientais, ao desconsiderar dimensões fundamentais da experiência vivida no território. Tal processo pode ser interpretado à luz do conceito de violência epistêmica, conforme proposto por Spivak (1988), na medida em que determinadas formas de conhecimento e experiência são sistematicamente excluídas dos marcos institucionais de reconhecimento. Ao mesmo tempo, a concentração dos impactos sobre populações diretamente afetadas, associada à ausência de mecanismos efetivos de participação e compensação, dialoga com a perspectiva da justiça ambiental discutida por Acselrad (2004), ao evidenciar a distribuição desigual dos danos e a assimetria de poder entre os atores envolvidos.

Nesse contexto, a explicitação dessas lacunas, a partir das narrativas produzidas no território, pode ser compreendida como uma forma de tensionamento das racionalidades institucionais, aproximando-se do que Foucault (2008) define como práticas de contra-conduta. Trata-se, portanto, de um movimento que não apenas revela limites dos instrumentos técnicos, mas também afirma outras formas de produzir e legitimar o conhecimento sobre os impactos socioambientais.

Considerações Finais

A análise desenvolvida neste estudo evidencia que os impactos socioambientais associados à Barragem Lago de Fronteiras não podem ser plenamente compreendidos a partir dos parâmetros técnico-instrumentais que tradicionalmente orientam os processos de licenciamento ambiental. A comparação entre as narrativas institucionais e comunitárias revelou a existência de racionalidades distintas e assimétricas, que operam com diferentes critérios de definição e reconhecimento dos impactos.

Enquanto a abordagem institucional privilegia a mensuração e a padronização, traduzindo o território em indicadores quantificáveis e categorias analíticas previamente definidas, as narrativas produzidas no território evidenciam o impacto socioambiental como um processo amplo, que envolve dimensões materiais, sociais e simbólicas. Nesse sentido, elementos como a incerteza prolongada, o sofrimento psicossocial, a fragmentação das relações comunitárias e a desigualdade no acesso à informação emergem como aspectos centrais da experiência vivida, permanecendo ausentes ou subdimensionados nos instrumentos institucionais.

Esses resultados indicam que os estudos ambientais operam por meio de recortes que limitam a compreensão da complexidade dos impactos, ao privilegiar dimensões mensuráveis em detrimento de processos sociais e subjetivos. Tal limitação expressa não apenas uma insuficiência metodológica, mas também critérios seletivos de validação do conhecimento, que influenciam diretamente o que é reconhecido como impacto no processo decisório.

Dessa forma, a disputa em torno dos impactos socioambientais extrapola a materialidade da obra, configurando-se como um embate também de natureza epistemológica, no qual diferentes formas de conhecimento sobre o território entram em tensão. A centralização das definições nas instâncias institucionais, associada à participação restrita das comunidades, contribui para o distanciamento entre o impacto formalmente descrito e aquele efetivamente vivenciado.

Diante disso, torna-se necessária a revisão dos modelos de avaliação ambiental, com a ampliação dos referenciais analíticos e a incorporação de abordagens mais sensíveis às realidades territoriais. A valorização dos saberes locais e o fortalecimento de processos participativos emergem como elementos fundamentais para a construção de práticas mais justas e inclusivas na gestão ambiental.

A principal contribuição do estudo consiste em evidenciar que os impactos socioambientais não são apenas efeitos materiais da intervenção, mas também construções políticas e epistemológicas, disputadas entre diferentes formas de produção e legitimação do conhecimento sobre o território.

Referências Bibliográficas

ACSELRAD, Henri Acselrad. Justiça ambiental e construção social do risco. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, Curitiba, n. 10, p. 35-47, 2004.

ACSELRAD, Henri Acselrad; MELLO, Cecília Campello do Amaral; BEZERRA, Gustavo das Neves. *O que é justiça ambiental*. Rio de Janeiro: Garamond, 2009.

ALIER, Joan Martínez Alier. *O ecologismo dos pobres: conflitos ambientais e linguagens de valoração*. São Paulo: Contexto, 2007.

CASTRO, Iná Elias de Castro. *O mito da necessidade: discurso e prática do combate à seca no Nordeste*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1992.

ESCOBAR, Arturo Escobar. *Territórios de diferença: lugar, movimentos sociais, vida e redes*. Popayán: Envión Editores, 2014.

FOUCAULT, Michel Foucault. *Segurança, território, população: curso dado no Collège de France (1977–1978)*. São Paulo: Martins Fontes, 2008.

HAESBAERT, Rogério Haesbaert. *O mito da desterritorialização: do "fim dos territórios" à multiterritorialidade*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

HALBWACHS, Maurice Halbwachs. *A memória coletiva*. São Paulo: Vértice, 1990.

HARAWAY, Donna Haraway. Situated knowledges: the science question in feminism and the privilege of partial perspective. *Feminist Studies*, v. 14, n. 3, p. 575-599, 1988.

LEFF, Enrique Leff. *Racionalidade ambiental: a reapropriação social da natureza*. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2006.

PORTO, Marcelo Firpo de Souza Porto. Complexidade, processos de vulnerabilização e justiça ambiental: um ensaio de epistemologia política. *Revista Crítica de Ciências Sociais*, n. 93, p. 31-58, 2011.

PORTO, Marcelo Firpo de Souza Porto; PACHECO, Tania; LEROY, Jean-Pierre. *Injustiça ambiental e saúde no Brasil: o mapa de conflitos*. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2013.

PERUZZO, Cecília Maria Krohling Peruzzo. *Comunicação nos movimentos populares: a participação na construção da cidadania*. Petrópolis: Vozes, 2009.

SANTOS, Boaventura de Sousa Santos. *A crítica da razão indolente: contra o desperdício da experiência*. São Paulo: Cortez, 2000.

SANTOS, Boaventura de Sousa Santos. Para além do pensamento abissal: das linhas globais a uma ecologia de saberes. *Revista Crítica de Ciências Sociais*, n. 78, p. 3-46, 2007.

SPIVAK, Gayatri Chakravorty Spivak. Can the subaltern speak? In: NELSON, Cary; GROSSBERG, Lawrence (org.). *Marxism and the interpretation of culture*. Urbana: University of Illinois Press, 1988. p. 271-313.

THIOLLENT, Michel Thiollent. *Metodologia da pesquisa-ação*. 18. ed. São Paulo: Cortez, 2011.

ZHOURI, Andréa Zhouri. Justiça ambiental, diversidade cultural e accountability: desafios para a governança ambiental. *Revista Brasileira de Ciências Sociais*, v. 27, n. 78, p. 45-62, 2012.

ZHOURI, Andréa Zhouri; LASCHEFSKI, Klemens. *Desenvolvimento e conflitos ambientais*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

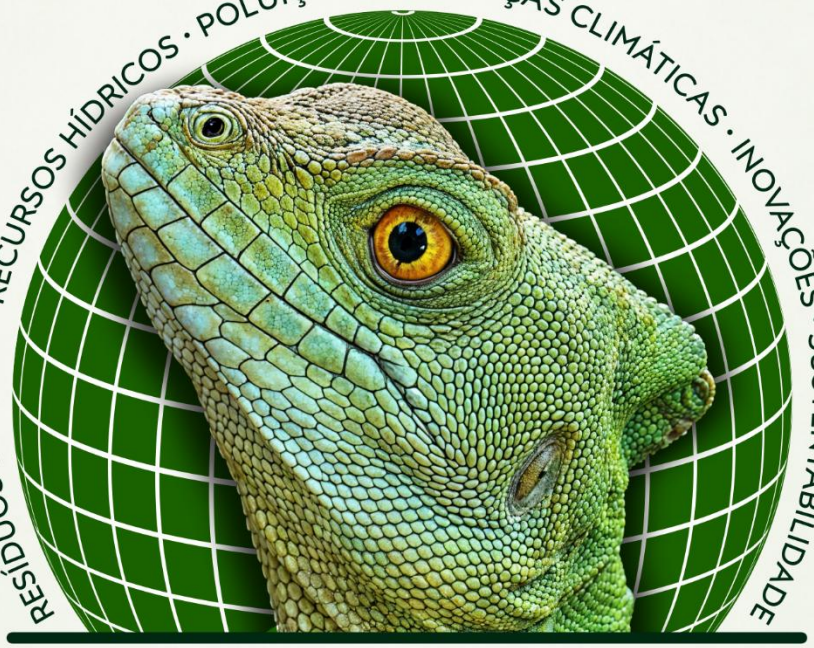
SILVA, José Borzacchiello da Silva. *Políticas públicas e semiárido: reflexões sobre a questão da seca*. Fortaleza: UFC, 2003.

Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS). *Estudo de Impacto Ambiental (EIA) – Barragem Lago de Fronteiras*. Fortaleza: DNOCS, 2010.

Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS). *Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) – Barragem Lago de Fronteiras*. Fortaleza: DNOCS, 2010.

ÁREA TEMÁTICA 19

MOBILIDADE URBANA



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE
ENGENHARIA AMBIENTAL

MONITORAMENTO DO SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO RODOVIÁRIO COLETIVO DO DISTRITO FEDERAL: UM ÍNDICE DE QUALIDADE DO TRANSPORTE PARA O SERVIÇO BÁSICO

1 Marconi Albuquerque, 2 Hudyeron Rocha, 3 Mariana Aguiar

1 Secretaria de Estado de Transporte e Mobilidade do Distrito Federal, e-mail: marconi.junior@campus.fcsh.unl.pt; 2 Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e-mail: hrocha@fe.up.pt; 3 Instituto Superior Técnico, e-mail: marianaaguiar@sapo.pt

Palavras-chave: índice de qualidade do transporte; sistema de transporte público; transporte rodoviário coletivo.

Resumo

Grande parte das deslocações pendulares no Distrito Federal (DF) ocorre em automóvel particular, o que impacta negativamente o meio urbano e seus residentes. Nesse cenário, o transporte público surge como uma alternativa mais vantajosa, ao conciliar a necessidade de deslocamento em larga escala com a equidade social e a preservação ambiental. No entanto, a competitividade do transporte público depende, entre outros fatores, do monitoramento contínuo do desempenho e da conformidade do serviço concedido. Para atender a essa exigência técnica, este estudo propõe o Índice de Qualidade do Transporte para o Serviço Básico (IQT/SB) para a avaliação do transporte público rodoviário coletivo. Esta ferramenta é uma estrutura multidimensional composta por quatro dimensões: qualidade contratual, qualidade da frota, qualidade operacional e satisfação do usuário, cada uma composta por cinco indicadores-chave. Os indicadores são normalizados em escala 0–1 e agregados por ponderação, garantindo um monitoramento rigoroso da qualidade do serviço. O modelo viabiliza a análise comparativa entre as operadoras de transporte coletivo e as séries temporais, atuando como uma ferramenta estratégica para a regulação setorial e para a alta gestão na tomada de decisão pública. Essa estrutura é fundamental para modernizar os sistemas de transporte no DF, otimizando a mobilidade urbana e assegurando que o rigor técnico resulte em padrões de excelência na qualidade dos serviços prestados à sociedade.

Introdução

O Distrito Federal (DF) localiza-se na região Centro-Oeste do Brasil, possui aproximadamente 5.800 km² de área territorial e é composto por 31 regiões administrativas, incluindo Brasília, capital do país (BRASIL, 2026). O DF apresenta uma população estimada em 3 milhões de habitantes e caracteriza-se por uma configuração territorial marcadamente dispersa e fragmentada (IPEDF, 2025). Este tecido urbano descontínuo impõe desafios estruturais à mobilidade e à integração socioespacial na região (Carmona et al., 2022).

Nesse contexto, observa-se uma forte dependência de veículos motorizados nos deslocamentos diários na região (Benjamim; Ribeiro; Nóbrega, 2025). Em 2022, os principais meios de transporte utilizados foram o automóvel particular e o transporte coletivo (ônibus e metrô), que representaram, respectivamente, 33% e 41% dos deslocamentos realizados (Rennó et al., 2024). O predomínio do transporte motorizado, especialmente do automóvel particular, que possui menor capacidade de transporte de passageiros em comparação ao transporte coletivo, acarreta impactos negativos no ambiente urbano e na qualidade de vida da população. Entre esses impactos, destacam-se a emissão de poluentes atmosféricos, a produção de ruído e o congestionamento viário, que se intensificam durante os deslocamentos pendulares nos horários de pico (Hang; Batterman, 2013).

Conforme aponta Banister (2008), o transporte público coletivo desempenha papel estratégico nas cidades ao conciliar a necessidade de deslocamento em larga escala com a preservação ambiental. Em cidades de grande e médio porte, como o DF, sua eficiência influencia diretamente a equidade social no acesso a oportunidades urbanas e na mitigação das emissões de poluentes decorrentes do tráfego (Litman, 2007; Martens; Lucas, 2018). Entretanto, a competitividade do transporte coletivo em relação ao automóvel depende da qualidade do serviço. A baixa confiabilidade, os longos tempos de espera e as interrupções decorrentes de falhas mecânicas ou acidentes vêm gerando um ciclo de perda de demanda e de ineficiência financeira na gestão pública (Beirão; Cabral, 2007; Diab; El-Geneidy, 2012). Nesse contexto, a melhoria da qualidade do transporte público constitui uma das principais estratégias para a sustentabilidade dos sistemas urbanos de mobilidade (Sánchez Toledano et al., 2025).

De modo geral, a literatura especializada aborda a qualidade do transporte público sob duas perspectivas complementares: a qualidade percebida (service quality) e a qualidade de desempenho (service performance). A primeira refere-se à avaliação subjetiva do usuário quanto à experiência de viagem, enquanto a segunda está associada ao cumprimento de padrões operacionais mensuráveis, como pontualidade, regularidade, frequência e disponibilidade do serviço (Eboli; Mazzulla, 2011; Tyrinopoulos; Antoniou, 2008). O conjunto dessas variáveis estrutura os indicadores de pontualidade e estabilidade do sistema, os quais, por sua vez, garantem a confiabilidade no cumprimento integral das viagens e dos itinerários (Foell et al., 2016).

Hensher, Stopher e Bullock (2003) argumentam que a percepção de qualidade é multidimensional, exigindo ferramentas capazes de sintetizar essa complexidade para além das métricas tradicionais. Nesse contexto, Tyrinopoulos e Antoniou (2008) apontam que a análise isolada de indicadores operacionais pode não representar adequadamente a experiência do passageiro, visto que sistemas podem cumprir metas operacionais e, ainda assim, apresentar avaliações negativas. Como resposta a esse

desafio, Eboli e Mazzulla (2011) recomendam a integração de indicadores objetivos e subjetivos, permitindo que a avaliação do sistema reflita, simultaneamente, a eficiência operacional e a satisfação do usuário. No cenário brasileiro, essa abordagem é corroborada pela Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP, 2013), que destaca que a priorização de indicadores híbridos auxilia a gestão pública ao fundamentar ações de melhoria operacional. Estudos nacionais subsequentes indicam que a percepção da população está fortemente associada às condições do transporte coletivo, sendo fatores como segurança, regularidade e conforto determinantes para a escolha entre o transporte público e o privado (ANTP, 2018; CNT, 2017). Em linha com essa evolução, Santos e Lima (2019) reforçam que a avaliação desses atributos de qualidade permite que gestores e operadores identifiquem falhas e priorizem investimentos, visando à eficiência do sistema.

Apesar desses avanços, no ambiente de serviços concedidos, persiste a dificuldade prática de integrar as dimensões contratuais, operacionais e perceptivas em um único instrumento, dada a complexidade e a natureza distinta dessas variáveis (Mouwen, 2015). Diante dessa lacuna, torna-se necessária uma métrica capaz de consolidar tais variáveis para reduzir a assimetria de informação entre o poder concedente e o operador, viabilizando uma avaliação sistêmica e contínua do serviço. Nesse cenário, este estudo apresenta e operacionaliza o Índice de Qualidade do Transporte para o Serviço Básico (IQT/SB), uma estrutura multidimensional baseada em quatro pilares: qualidade contratual, da frota, operacional e satisfação do usuário. Ao unificar esses indicadores, o índice permite a mensuração do desempenho do sistema e o acompanhamento contínuo da prestação do serviço, viabilizando a comparação temporal, a avaliação entre operadores e o suporte à tomada de decisão gerencial, consolidando-se como ferramenta essencial para a modernização da gestão e a elevação dos padrões de qualidade no transporte público.

A Lei das Concessões, Lei Federal nº 8.987 de 13 de fevereiro de 1995, que regulamenta o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal, constitui o principal referencial para o conceito de um serviço público adequado (BRASIL,1995). Neste diploma legal, o conceito de *serviço adequado* é definido como aquele que atende às condições de regularidade, continuidade, eficiência, segurança, atualidade, generalidade, cortesia na prestação e modicidade tarifária. No âmbito do serviço de transporte urbano público coletivo, tais diretrizes desdobram-se em metas voltadas à prestação de um serviço eficiente, tecnologicamente atualizado e ambientalmente adequado, assegurando amplo acesso à população usuária.

A proposta de um Índice de Qualidade do Transporte para o Serviço de Transporte Urbano foi estruturada com base nessas premissas, buscando contemplar indicadores-chave capazes de monitorar a prestação de um serviço público adequado. A esse arcabouço foi incorporado o conceito de *modernidade*, entendido como a oferta do serviço por meio de infraestrutura e recursos compatíveis com as evoluções tecnológicas disponíveis, de modo a proporcionar maior conforto ao passageiro, promover a sustentabilidade e evitar a obsolescência tecnológica. Seja esta oferta de melhores e mais modernas tecnologias obrigatória ou não no contrato da concessão.

A partir dessas diretrizes, conclui-se que um sistema robusto de avaliação não deve se limitar à análise isolada de indicadores, mas sim adotar uma abordagem integrativa, por meio de índices que consolidem variáveis essenciais à compreensão da realidade operacional do Sistema de Transporte Público Coletivo. Nesse sentido, um índice de qualidade adequado deve refletir, de forma articulada, quatro dimensões fundamentais: (i) gestão da conformidade contratual; (ii) gestão da manutenção da infraestrutura e dos equipamentos; (iii) gestão da satisfação do passageiro; e (iv) gestão da operação dos serviços ofertados. Estas dimensões encontram respaldo em metodologias consolidadas, estando presentes, de forma concomitante, em modelos adotados por instituições como a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e a Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP), bem como no Edital da Concessão de 2011 do transporte urbano no Distrito Federal.

Material e Métodos

A metodologia para apuração do IQT/SB compreende três etapas: levantamento de dados; cálculo dos indicadores e do IQT/SB consolidado; e classificação das operadoras. O IQT/SB é composto por quatro dimensões, sendo cada uma delas representada por um índice que reúne cinco indicadores-chave:

1. **IQC – Índice de Qualidade Contratual**
    1. Grau de Conformidade para Equipamentos Embarcados
    2. Grau de Conformidade para Condicionantes da Garagem
    3. Grau de Conformidade para Condições de habilitação
    4. Grau de Conformidade para Condicionantes Financeiras
    5. Grau de Conformidade para Sustentabilidade Ambiental

2. **IQF – Índice de Qualidade da Frota**
    1. Grau de Conformidade para Idade média da frota
    2. Grau de Conformidade para Inspeção da frota
    3. Grau de Falhas em Operação
    4. Grau de Conformidade para Modernidade da frota
    5. Grau de Conformidade para Frota em operação

3. IQO – Índice de Qualidade Operacional

1. Grau de Conformidade para Cumprimento de viagens programadas
2. Grau de Conformidade para Pontualidade nas partidas realizadas
3. Grau de Conformidade para Interrupção de viagens
4. Grau de Conformidade para Cumprimento de itinerário
5. Grau de Conformidade para Sinistros em operação

4. IQS – Índice de Qualidade para a Satisfação

1. Grau de Conformidade para Reclamações gerais de ouvidoria
2. Grau de Conformidade para Reclamações de conduta de prepostos
3. Grau de Resolubilidade de Reclamações
4. Grau de Satisfação dos Passageiros
5. Grau de Lotação

O IQT/SB é calculado em uma escala de grau 0 (pior desempenho) a 1 (melhor desempenho) e, a partir do resultado do período, as operadoras são ordenadas em um ranqueamento de forma decrescente, conforme o valor do apurado. Em caso de empate entre duas ou mais operadoras, os critérios de desempate seguirão a seguinte ordem:

- Maior valor de Grau de Conformidade para Modernidade da frota;
- Maior valor de Grau de Conformidade para Condicionantes Financeiras;
- Maior valor de Grau de Conformidade para Reclamações gerais de ouvidoria; e
- Maior valor Grau de Conformidade para Cumprimento de viagens programadas.

O IQT/SB é calculado com base na fórmula:

$$IQT = x_1IQC + x_2 \times IQF + x_3 \times IQO + x_4 \times IQS$$

Onde:
IQT = Índice de Qualidade do Transporte para o Serviço Básico
IQC = Índice de qualidade Contratual
IQF = Índice de Qualidade da Frota
IQO = Índice de Qualidade Operacional
IQS = Índice de Satisfação
x_1, x_2, x_3 e x_4 = Peso relativo para o índice

Os pesos relativos podem ser calibrados de acordo com as estratégias definidas para o sistema de transporte, refletindo a prioridade considerada para cada dimensão do serviço concedido. Para esta calibragem inicial considerou-se os valores:

x_1=0,2 x_2=0,3 x_3=0,4 x_4 =0,1

As operadoras são enquadradas em cinco categorias de desempenho, conforme o seu resultado:

- Ótima: superior a 0,8;
- Boa: superior a 0,6 e inferior ou igual a 0,8;
- Regular: superior a 0,4 e inferior ou igual a 0,6;
- Ruim: superior a 0,2 e inferior ou igual a 0,4;
- Crítica: inferior ou igual a 0,2.

Devido às diferenças de grandezas nas variâncias e amplitudes de cada indicador, é necessário aplicar um processo de normalização, garantindo uma escala comum para todos os indicadores, sendo que a escala adotada varia de grau 0 a 1, em que 0 representa o pior desempenho da empresa e 1 corresponde ao melhor desempenho relativo à amostra. A normalização é concebida por meio de uma transformação de escala qualitativa. Os parâmetros máximo e mínimo são determinados com base na análise do alcance da meta estabelecida para calibrar o indicador.

Destaca-se que a confiabilidade do IQT/SB depende diretamente da qualidade dos dados gerados a cada viagem pelas operadoras ao Centro de Supervisão Operacional (CSO) da Secretaria de Estado de Transporte e Mobilidade do Distrito Federal (SEMOB-DF). Assim, torna-se fundamental o pleno atendimento de todos os requisitos do Sistema Integrado de Mobilidade (Tecnologia) e do Sistema de Vigilância da Frota. Neste contexto, nos casos em que a operadora não forneça os dados necessários para o cálculo de um indicador, é atribuída a nota mínima (0) a esse indicador, refletindo o não atendimento às exigências de

conformidade contratual, transparência e prestação de contas. Estes conjuntos de indicadores são calibrados conforme sua relevância considerada para a excelência do STPC/DF, podendo ser ajustados conforme a modulação almejada para a qualidade do serviço, oferecendo assim uma evolução sólida e consistente da qualidade do serviço oferecido à população.

Resultados e Discussão

O método foi aplicado e o IQT/SB foi calibrado, com a atribuição de pesos descrita nas Tabelas 01–04. Estes pesos refletem a importância que cada indicador assume na realidade do transporte público local, podendo ser calibrado para modular o comportamento dos operadores. Aqueles quesitos considerados estratégicos ou ainda críticos podem receber um peso maior, para forçar os operadores a dar maior atenção a eles.

Tabela 01 - IQT/SB Calibrado - Índice de qualidade Contratual

	IQC – Índice de qualidade Contratual	**Peso**
IQC	**Grau de Conformidade para Equipamentos Embarcados** Valor de referência: Porcentagem da frota de ônibus urbano em conformidade com as exigências de equipamentos embarcados do Anexo II. 5.1, Edital 2011. Unidade de medida: Porcentagem.	**0,50**
	Grau de Conformidade para Condicionantes da Garagem Valor de referência: Quantidade de garagens do operador que atendem às condicionantes do ANEXO II.6 do Edital. Unidade de medida: Número.	**0,20**
	Grau de Conformidade para Condições de habilitação Valor de referência: Quantidade de trimestres móveis em que o operador manteve as condições de habilitação, em relação aos 4 últimos trimestres. Unidade de medida: Número.	**0,10**
	Grau de Conformidade para Condicionantes Financeiras Valor de referência: Publicidade do Balanço Patrimonial/Demonstrações Contábeis e índice de liquidez corrente igual ou maior que 1 ano período avaliado. Unidade de medida: Número e qualitativo (SIM/NÃO).	**0,10**
	Grau de Conformidade para Sustentabilidade Ambiental Valor de referência: A Operadora atende às práticas de sustentabilidade ambiental previstas no art. 8º da Lei Distrital n.º 4.770, de 22 de fevereiro de 2012 conforme o Manual de Condicionantes Socioambientais, Anexo VII do Edital 2011 do STPC/DF. Unidade de medida: Qualitativo (SIM/NÃO).	**0,10**

Fonte: os Autores

Tabela 02 - IQT/SB Calibrado - Índice de Qualidade da Frota

	IQF – Índice de Qualidade da Frota	
IQF	**Grau de Conformidade para Idade média da frota** Valor de referência: Idade média da frota total do operador cadastrada no serviço em relação a sua vida útil média determinada. Unidade de medida: Número.	**0,20**
	Grau de Conformidade para Inspeção da frota Valor de referência: Porcentagem de veículos aprovados em primeiro procedimento de vistoria periódica em relação ao total de veículos vistoriados. Unidade de medida: Porcentagem.	**0,30**
	Grau de Falhas em Operação Valor de referência: Porcentagem de veículos aprovados em relação ao total da frota vistoriada em campo. Unidade de medida: Porcentagem.	**0,25**
	Grau de Conformidade para Modernidade da frota Valor de referência: Porcentagem da frota de ônibus urbano do operador que atende aos critérios de inovação e modernidade tecnológica em relação à sua frota total. Unidade de medida: Porcentagem.	**0,05**
	Grau de Conformidade para Frota em operação Valor de referência: Média real da frota mantida em operação em relação a frota programada para o operador. Unidade de medida: Porcentagem.	**0,20**

Fonte: os Autores

Tabela 03 - IQT/SB Calibrado - Índice de Qualidade Operacional

IQO	**IQO – Índice de Qualidade Operacional**	
	Grau de Conformidade para Cumprimento de viagens programadas Valor de referência: Porcentagem das viagens admitidas como realizadas em relação ao total de viagens programadas Unidade de medida: Porcentagem.	**0,25**
	Grau de Conformidade para Pontualidade nas partidas realizadas Valor de referência: Porcentagem das viagens admitidas como pontuais em relação ao total de partidas realizadas. Unidade de medida: Porcentagem.	**0,25**
	Grau de Conformidade para Interrupção de viagens Valor de referência: Porcentagem das viagens concluídas em relação ao total de partidas realizadas. Unidade de medida: Porcentagem.	**0,15**
	Grau de Conformidade para Cumprimento de itinerário Valor de referência: Porcentagem de viagens em conformidade com o itinerário em relação ao total de partidas realizadas. Unidade de medida: Porcentagem.	**0,25**
	Grau de Conformidade para Sinistros em operação Valor de referência: Média para o período da quantidade de km mensais percorridos em operação divido pela quantidade de sinistros ocorridos em operação. Unidade de medida: Número.	**0,10**

Fonte: os Autores

Tabela 04 - IQT/SB Calibrado - Índice de Qualidade da Satisfação

IQS	**IQS – Índice de Qualidade da Satisfação**	
	Grau de Conformidade para Reclamações gerais de ouvidoria Valor de referência: Número de passageiros pagantes transportados a cada reclamação do serviço. Unidade de medida: Número.	**0,30**
	Grau de Conformidade para Reclamações de conduta de prepostos Valor de referência: Número de passageiros transportados a cada reclamação de Conduta de Preposto. Unidade de medida: Número.	**0,25**
	Grau de Resolubilidade de Reclamações Valor de referência: Percentual de reclamações atendidas dentro do limite de prazo Unidade de medida: Porcentagem.	**0,30**
	Grau de Satisfação dos Passageiros Valor de referência: Resultado da pesquisa de satisfação do passageiro. Unidade de medida: Número.	**0,07**
	Grau de Lotação Valor de referência: Número de passageiros em pé por m². Unidade de medida: Número.	**0,08**

Fonte: os Autores

O IQT/SB deve inicialmente ser planejado para aplicação trimestral, onde cada dimensão é analisada com base no acumulado de seus resultados durante o período. Esta abordagem permite uma visão mais abrangente e detalhada do desempenho do serviço, facilitando a identificação de áreas que necessitam de melhorias. Nesta fase de implantação, recomenda-se que a avaliação seja realizada semestralmente, em função das providências necessárias para a devida comunicação aos administrados e programação das ferramentas tecnológicas. Dessa forma, a primeira avaliação do ano funcionará como uma pré-avaliação, permitindo que o operador corrija eventuais desvios na prestação do serviço, enquanto o poder concedente calibra as ferramentas de aferição. Uma vez estabelecida a maturidade do processo, a frequência da medição poderá ser aumentada gradualmente, até que seja totalmente automatizada e transparente.

A avaliação mensal é considerada a ideal para o um sistema de transporte urbano em função de seu dinamismo, sendo fundamental seu monitoramento concomitante com a prestação do serviço. Nesse formato, as correções poderão ser aplicadas de maneira mais próxima à detecção dos desvios, retroalimentando o sistema em um ciclo contínuo de melhorias. Porém, esta não é a frequência recomendada para o momento de implantação devido aos fatores tecnológicos, procedimentais e humanos ainda não terem sido devidamente capacitados e testados. Isto não impede que ensaios mensais sejam realizados até que a confiabilidade do sistema esteja determinada e um resultado oficial do IQT/SB seja homologado e publicizado. Caso seja definido como avaliação mensal, com objetivo de promover o reconhecimento do desempenho individual, a concessionária pode obter até 0,2 pontos (limitado à nota máxima do indicador) pela melhoria do resultado de cada indicador em relação ao mês anterior. O percentual de melhoria obtido é aplicado ao total de pontos possíveis.

Para que o IQT/SB se torne efetivo, recomenda-se que: este seja automatizado por meio de ferramenta tecnológica própria para o processo de coleta de dados e cálculo dos seus indicadores e índices; os indicadores que não forem possíveis de imediata implementação possam ser suprimidos/sobrestados e substituídos por uma redistribuição dos pesos, até que os dados e/ou o sistema de tecnologia da informação estejam disponíveis para atender com confiabilidade ao seu propósito; o quadro de metas institucionais para sua calibragem seja determinado por um colegiado multidisciplinar; a periodicidade inicial da sua apuração seja semestral, para que haja uma adequada fase de implementação e comunicação da metodologia a todos os atores envolvidos; seja realizado um teste piloto com base na operação real da Sociedade de Transportes Coletivos de Brasília (TCB) para sua demonstração e validação; seja instaurado novo grupo de trabalho ou comissão para acompanhamento da implantação do novo sistema de avaliação, com prazo de 90 dias para validação e entrega dos produtos.

Considerações Finais

A proposta apresentada estrutura o Índice de Qualidade do Transporte para o Serviço Básico (IQT/SB) a partir de quatro índices principais, cada um composto por cinco indicadores-chave. Esses índices são agregados por meio de um sistema de calibração que sintetiza o desempenho do serviço em uma métrica única de avaliação. A aplicação dessa metodologia contribui para o aprimoramento da gestão da mobilidade urbana e do transporte público coletivo, gerando informações relevantes para a melhoria contínua da qualidade do serviço e, consequentemente, da qualidade de vida da população usuária do transporte público.

A implantação do IQT/SB deve ocorrer de forma gradual, permitindo a adequada comunicação com os atores envolvidos, a adaptação dos sistemas tecnológicos de monitoramento e a validação dos procedimentos operacionais necessários para sua aplicação. Nesse sentido, recomenda-se que a periodicidade inicial de avaliação seja semestral, permitindo uma fase de adaptação institucional e técnica, seguida posteriormente pela adoção de avaliações trimestrais após reavaliação do sistema. Sua adoção representa um avanço relevante para a gestão do Sistema do Transporte Público, consolidando-se como instrumento de monitoramento contínuo da qualidade do serviço prestado pelas operadoras. Ao possibilitar a mensuração sistemática do desempenho das concessionárias, o índice contribui para aumentar a transparência da gestão, apoiar o processo regulatório e orientar ações de melhoria no serviço de transporte público.

Como perspectiva de pesquisa futura, recomenda-se a aplicação-piloto do IQT/SB em uma ou mais operadoras do sistema de transporte coletivo do DF. Essa etapa permitirá avaliar a aplicabilidade prática do índice, identificar eventuais limitações metodológicas e promover ajustes nos indicadores e nos parâmetros de calibração. Além disso, a implementação do índice permitirá comparar o desempenho entre operadoras e acompanhar a evolução da qualidade do serviço ao longo do tempo, contribuindo para o aperfeiçoamento contínuo do sistema de transporte público coletivo.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Secretaria de Estado de Transporte e Mobilidade do Distrito Federal (SEMOB-DF) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (ANTP). Índice de Qualidade do Transporte (IQT). São Paulo: ANTP, 2013. Disponível em: https://files-server.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/01/21/D9841D44-1D3C-4148-90A0-DA0BFD11E0BB.pdf. Acesso em: 13 fev. 2026.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (ANTP). Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da ANTP - Relatório Geral 2018. São Paulo: ANTP, 2018. Disponível em: https://www.antp.org.br/sistema-de-informacoes-da-mobilidade/. Acesso em: 13 fev. 2026.

BANISTER, David. The sustainable mobility paradigm. Transport Policy, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 73-80, mar. 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005.

BEIRÃO, Gabriela; CABRAL, J. A. Sarsfield. Understanding attitudes towards public transport and private car: A qualitative study. Transport Policy, [S. l.], v. 14, n. 6, p. 478-489, nov. 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.04.009.

BENJAMIM, A. A.; NÓBREGA, B. G.; RIBEIRO, R. J. da C. Cidade para carros ou para pessoas? A dependência do carro no Distrito Federal. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL (ENANPUR), 21., 2025, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: ANPUR, 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/397014944_CIDADE_PARA_CARROS_OU_PARA_PESSOAS_A_DEPENDENCIA_DO_CARRO_NO_DISTRITO_FEDERAL. Acesso em: 16 fev. 2026.

BRASIL. Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 14 fev. 1995

BRASIL. Portal de Dados Abertos: Distrito Federal. Brasília: Ministério da Gestão e da Inovação em Serviços Públicos, 2026. Disponível em: https://dados.gov.br/dados/organizacoes/visualizar/distrito-federal. Acesso em: 14 fev. 2026.

CARMONA, Paulo Afonso Cavichioli; OLIVEIRA, Tatiana Reinehr; COELHO, Juliana Machado; AMARAL, Rubens. Habitação de interesse social no Plano Piloto: operações urbanas consorciadas como resposta à segregação espacial no DF/ Affordable Housing in Plano Piloto: Consortiated Urban Operations as Response to Space Segregation in DF. Revista de Direito da Cidade, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 1707–1729, 2022. DOI: 10.12957/rdc.2022.57145. Disponível em: https://www.e-publicacoes.uerj.br/rdc/article/view/57145. Acesso em: 13 mar. 2026.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa CNT de mobilidade da população urbana 2017. Brasília: CNT, 2017. 96 p. Disponível em: https://cnt.org.br/mobilidade-populacao-urbana. Acesso em: 12 fev. 2026.

DIAB, Ehab I.; EL-GENEIDY, Ahmed M. Understanding the impacts of a combination of service improvement strategies on bus running time and passenger's perception. Transportation Research Part A: Policy and Practice, [S. l.], v. 46, n. 3, p. 614-625, mar. 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.11.013.

EBOLI, Laura; MAZZULLA, Gabriella. A methodology for evaluating transit service quality based on subjective and objective measures from the passenger's point of view. Transport Policy, [S. l.], v. 18, n. 1, p. 172-181, jan. 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.07.007.

FOELL, Stefan et al. Regularity of Public Transport Usage: A Case Study of Bus Rides in Lisbon, Portugal. Journal of Public Transportation, [S. l.], v. 19, n. 4, p. 161-177, out. 2016. Disponível em: https://doi.org/10.5038/2375-0901.19.4.10.

HENSHER, David A.; STOPHER, Peter; BULLOCK, Philip. Service quality – developing a service quality index in the provision of commercial bus contracts. Transportation Research Part A: Policy and Practice, [S. l.], v. 37, n. 6, p. 499-517, jul. 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0965-8564(02)00075-7.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTATÍSTICA DO DISTRITO FEDERAL (IPEDF). Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios Ampliada – PDAD-A 2024: Relatório do Distrito Federal. Brasília: IPEDF Codeplan, 2025. Disponível em: https://pdad.ipe.df.gov.br/files/reports/Relatorio_DF090725.pdf. Acesso em: 15 fev. 2026.

LITMAN, T. Developing Indicators for Comprehensive and Sustainable Transport Planning. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, [S. l.], v. 2017, n. 1, p. 10-15, 2007. DOI: https://doi.org/10.3141/2017-02.

MARTENS, Karel; LUCAS, Karen. Perspectives on transport and social justice. In: CRAIG, Gary (ed.). Handbook on Global Social Justice. Cheltenham: Edward Elgar, 2018. p. 351-370. Disponível em: https://doi.org/10.4337/9781786431424.00036

MOUWEN, A. Drivers of customer satisfaction with public transport services. Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 78, p. 1-20, ago. 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.05.005.

RENNÓ, L. et al. ObservaDF: desigualdades e políticas públicas no Distrito Federal. Brasília: UnB, 2025. 1 e-book (PDF). Disponível em: https://observadf.unb.br/wp-content/uploads/2025/01/E-book_Livro_Observa_DF.pdf. Acesso em: 17 fev. 2026.

SANTOS, J. B.; LIMA, J. P. Priorização de indicadores de qualidade do transporte público: um estudo de caso em Itajubá (MG). In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 33., 2019, Balneário Camboriú. Anais [...] Rio de Janeiro: ANPET, 2019. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Gest%C3%A3o%20de%20Transportes/Gest%C3%A3o%20do%20Transporte%20de%20Passageiros/1_153_AC.pdf. Acesso em: 12 fev. 2026.

SÁNCHEZ TOLEDANO, Joaquín et al. The efficiency of urban public transport and its impact on environmental sustainability. Sustainable Technology and Entrepreneurship, [s. l.], v. 4, n. 2, 100097, maio/ago. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.stae.2025.100097.

TYRINOPOULOS, Yannis; ANTONIOU, Constantinos. Public transit user satisfaction: Variability and policy implications. Transport Policy, [S. l.], v. 15, n. 4, p. 260-272, jul. 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2008.06.002.

ZHANG, K.; BATTERMAN, S. Air pollution and health risks due to vehicle traffic. Science of the Total Environment, v. 450-451, p. 307-316, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.074.

O USO DA MODELAGEM BASEADA EM AGENTES NA MOBILIDADE: UMA REVISÃO DA LITERATURA

1 Carlos Henrique Rodrigues Bento, 2 Heliana Barbosa Fontenele, 3 Carlos Alberto do Prado da Silva Junior
1 Universidade Estadual de Londrina, e-mail: carlos.henrique@uel.br; 2 Universidade Estadual de Londrina, e-mail: heliana@uel.br; 3 Universidade Estadual de Londrina, e-mail: cprado@uel.br

Palavras-chave: Mobilidade Ativa; Modelagem Baseada em Agentes; Escolha Modal.

Resumo

Os desafios da mobilidade urbana contemporânea, marcados pela predominância do transporte motorizado individual e pelo impacto ambiental das emissões de poluentes, demandam ferramentas de planejamento capazes de simular o comportamento humano frente a novas políticas de transporte. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre a utilização da Modelagem Baseada em Agentes (ABM) para a análise da escolha modal, com foco no transporte ativo. A metodologia seguiu um processo iterativo de busca nas bases Scopus e Web of Science, resultando na seleção e análise de um portfólio de 26 artigos científicos. Os resultados revelam um campo em expansão, com 73% das publicações concentradas nos últimos cinco anos, lideradas por instituições da China e dos Estados Unidos. Tecnicamente, observou-se a predominância de modelos customizados e do software NetLogo, destacando-se a eficácia da ABM em capturar regras de decisão complexas. Quanto às intervenções simuladas, 85% dos estudos utilizam um mix de políticas (Policy Mix), combinando medidas de restrição ao automóvel (push), como taxas de congestionamento e estacionamento, com incentivos à mobilidade ativa (pull), como melhorias na infraestrutura e segurança viária. A análise também aponta que 73% das pesquisas dependem de dados secundários, evidenciando a necessidade de maior fomento a coletas primárias para validação de cenários específicos. Conclui-se que a ABM se consolidou como um método robusto para o planejamento urbano, oferecendo subsídios para a implementação de estratégias de transporte sustentável em áreas urbanas. A sistematização dos dados aqui apresentada fornece uma base teórica sólida para gestores e pesquisadores que buscam otimizar a transição para modos de transporte de baixo impacto ambiental, reforçando a importância de incentivos diretos na mudança de hábitos de deslocamento de jovens estudantes e da população em geral.

Introdução

Historicamente, a maioria das cidades foi projetada para priorizar o deslocamento por veículos motorizados, sendo, em sua grande maioria, automóveis particulares. No entanto, esse modelo vem atingindo um ponto de saturação que compromete a eficiência urbana e a qualidade de vida dos cidadãos (Sommer et al., 2022). Estudos como o de Godic et al. (2025) demonstram que, além de causar problemas ambientais, congestionamentos e acidentes, a predominância do transporte individual motorizado impõe custos elevados à saúde pública devido ao aumento do comportamento sedentário entre os seus usuários.

Como resposta a esses desafios, governos e planejadores urbanos têm buscado estratégias para incentivar a mobilidade ativa, como a caminhada e o uso da bicicleta, utilizando o transporte como uma ferramenta de gestão estratégica (Orsi; Geneletti, 2016). No entanto, a transição para modelos não motorizados enfrenta barreiras complexas, pois a eficácia de uma política não depende apenas da infraestrutura física, mas da forma como os indivíduos percebem e reagem a essas mudanças sob condições de incerteza (Zeng; Li; Hensher, 2025). Neste contexto, a Modelagem Baseada em Agentes (ABM) surge como uma ferramenta fundamental, permitindo simular o comportamento de indivíduos heterogêneos e avaliar o impacto de intervenções antes da sua implementação real(Sagdieva; Van Dam; Yang, 2025). Estudos indicam que a integração de políticas de restrição ao automóvel (*push*) com incentivos diretos ao transporte ativo (*pull*) é essencial para superar a inércia do hábito e resolver problemas crônicos de acessibilidade(Zellner et al., 2016).

Diante da complexidade urbana, a utilização de campus universitários como "laboratórios vivos" (*living labs*) apresenta-se como uma estratégia eficaz para a experimentação de novos paradigmas de mobilidade (Orsi; Geneletti, 2016). Por serem ambientes de escala reduzida e com gestão centralizada, as universidades funcionam como microcosmos que permitem testar a eficácia de incentivos específicos de forma controlada antes de sua expansão para a malha urbana (Sagdieva; Van Dam; Yang, 2025). Nesse cenário, a aplicação da Modelagem Baseada em Agentes (ABM) possibilita a simulação de interações intermodais complexas e padrões de deslocamento bem definidos dentro dos limites do campus (Wörle et al., 2021). A análise desses sistemas fechados ajuda a prever como mudanças na oferta de transporte ou benefícios diretos influenciam a escolha racional e social dos usuários(Masoud; Idris; Lovegrove, 2023). Assim, o ambiente acadêmico torna-se o campo de prova ideal para políticas de incentivo à mobilidade ativa que buscam superar a dependência do automóvel (Zellner et al., 2016).

A eficácia de políticas de mobilidade em longo prazo depende, fundamentalmente, da compreensão do comportamento de jovens universitários, que se encontram em uma fase crítica de formação de hábitos de deslocamento(Masoud; Idris; Lovegrove, 2023). Estudos indicam que intervir nessa parcela da população é estratégico, pois escolhas modais consolidadas durante a juventude tendem a se perpetuar na vida adulta, moldando a cultura de transporte das próximas décadas (Yang; Diez-Roux, 2013). No entanto, para que essa transição ocorra, é necessário mitigar a aversão à ambiguidade inerente à mudança de modal, oferecendo recompensas claras que compensem o esforço da troca do automóvel pela bicicleta (Zeng; Li; Hensher, 2025). Nesse contexto, a introdução de benefícios diretos e tangíveis surge como um fator de "puxada" (*pull*) capaz de acelerar o aprendizado social e a aceitação de modos ativos no campus (Sagdieva; Van Dam; Yang, 2025). Assim, focar no público jovem não é apenas uma escolha demográfica, mas uma estratégia para garantir que a mobilidade sustentável deixe de ser uma simulação e se torne uma prática urbana cotidiana (Sommer et al., 2022).

Material e Métodos

O objetivo central desta revisão foi investigar, na literatura global, pesquisas que utilizassem a Modelagem Baseada em Agentes (*Agent-Based Modeling* – ABM) para simular situações complexas de transporte e mobilidade urbana. Para tal, foram selecionadas as bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, justificadas por sua abrangência multidisciplinar e pelo alto rigor de indexação. Como critérios de elegibilidade iniciais, estabeleceu-se o recorte para artigos publicados nas línguas portuguesa e inglesa, visando capturar tanto a produção internacional de impacto quanto estudos de caso regionais relevantes.

Para iniciar o processo e obter uma compreensão geral do volume de publicações envolvendo a temática, foi realizada uma busca exploratória inicial utilizando o termo isolado "*Agent Based Model*" em ambas as bases. Esta etapa resultou em uma ampla variedade de registros, totalizando 2.441 documentos na *Scopus* e 1.182 na *Web of Science*, evidenciando a necessidade de utilização de *queries* de busca mais refinadas.

A estratégia de busca seguiu um processo iterativo de refinamento em três ciclos. No primeiro ciclo, adotou-se uma abordagem abrangente, combinando dois blocos de descritores: o método e o contexto geral, resultando na seguinte expressão:

Query 1: ("Agent-Based Model*" OR "Agent Based Model*") AND ("Urban Mobility" OR "Urban Transport*" OR "Travel Behavio*" OR "Modal Choice" OR "Non-Motorized Transport*" OR "Active Transport*")

Esta busca retornou um volume expressivo de registros (458 na *Scopus* e 236 na *Web of Science*). Embora os resultados confirmassem a popularidade do tema, indicaram a necessidade de maior especificidade, visto que muitos estudos tangenciavam a modelagem de agentes sem aprofundar nas dinâmicas de escolha modal.

Diante da abrangência excessiva, procedeu-se ao segundo ciclo, introduzindo uma camada adicional de especificidade. Diferentemente da etapa anterior, esta busca exigiu a interseção de três eixos temáticos: o método, o contexto e o fenômeno comportamental:

Query 2: (("Agent-Based Model*" OR "Agent Based Model*" OR "Multi-Agent System*") AND ("Urban Mobility" OR "Urban Transport*" OR "Traffic" OR "Transport*") AND ("Modal Choice" OR "Mode Choice" OR "Travel Behavio*" OR "Modal Split"))

A inclusão deste terceiro bloco refinou a amostra para 266 artigos na *Scopus* e 156 na *Web of Science*. Apesar do aumento na precisão, observou-se a persistência de estudos que citavam os termos de forma desconexa ao longo do texto. Para garantir a máxima aderência ao escopo, realizou-se um terceiro e definitivo refinamento utilizando o operador de proximidade "*W/25*" nas buscas em títulos, resumos e palavras-chave:

Query 3: (("Agent-Based Model*" OR "Agent Based Model*" OR "Multi-Agent System*") W/25 (("Travel Behavior*" OR "Travel Behaviour*") OR "Modal Choice" OR "Mode Choice" OR "Non-Motorized Transport*"))

O operador "*W/25*" restringiu a recuperação aos documentos em que a técnica de modelagem e o comportamento de viagem aparecessem semanticamente conectados em um intervalo máximo de 25 palavras. Essa estratégia resultou em um conjunto altamente qualificado de 64 artigos na *Scopus* e 38 na *Web of Science*.

Na etapa de consolidação, os resultados foram unificados, totalizando 102 registros. Após o processo de desduplicação, restaram 64 artigos únicos. Esses documentos foram submetidos a uma triagem qualitativa através da leitura de títulos e resumos, aplicando-se os critérios de exclusão para eliminar estudos fora do escopo. Ao final deste processo, obteve-se um portfólio definitivo de 26 artigos, que constituem a base para a análise sistemática desta pesquisa.

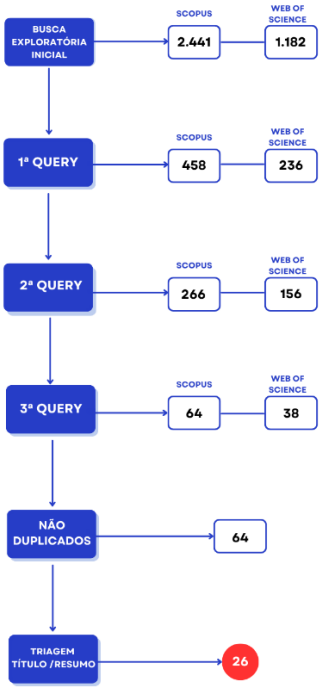


Figura 1: Resumo do processo de revisão sistemática. Fonte: Próprio autor (2026)

Para sistematizar a análise, elaborou-se uma matriz de extração de dados, facilitando a comparação entre os estudos e a identificação de lacunas. As categorias analíticas definidas são detalhadas a seguir:

- Identificação do Estudo (ID): registros bibliográficos fundamentais (título, autoria e ano);
- Escala Geográfica: País onde o artigo foi produzido;
- Ferramenta Computacional (*Software*): identificação da plataforma de simulação utilizada;
- Dados de Entrada (*Input Data*): verificação se a população sintética foi gerada a partir de dados fornecidos por terceiros ou por pesquisas próprias dos escritores;
- Políticas Testadas (Cenários): categorização das intervenções em medidas de restrição (*Push*), incentivo (*Pull*) ou estratégias combinadas (*Policy Mix*), além de estudos focados em Calibração e Validação (*Baseline*).

Resultados e Discussão

A análise do portfólio de 26 artigos selecionados permitiu a estruturação dos resultados em eixos fundamentais que descrevem o panorama atual da Modelagem Baseada em Agentes aplicada à mobilidade ativa. Inicialmente, apresenta-se uma caracterização bibliométrica e técnica dos estudos, abordando a evolução temporal das publicações, as principais ferramentas computacionais utilizadas e as escalas geográficas de simulação predominantes. Na sequência, a discussão aprofunda-se na natureza das políticas de transporte testadas, categorizando as intervenções em estratégias de restrição e incentivo, com foco especial na eficácia dos modelos que integram benefícios diretos aos usuários.

A análise da evolução temporal das publicações revela um crescimento exponencial no interesse acadêmico pela Modelagem Baseada em Agentes aplicada ao transporte. Como pode ser observado na Figura 02, o volume de artigos identificados saltou de 4 registros no período entre 2008 e 2015 para 13 publicações no intervalo mais recente, compreendido entre 2021 e 2025. Este aumento de mais de 200% na produção científica nos últimos dez anos sinaliza que a simulação de agentes se consolidou como uma técnica de vanguarda para lidar com a complexidade dos novos paradigmas de mobilidade urbana. Esse fenômeno pode ser atribuído tanto ao avanço da capacidade computacional quanto à urgência em testar políticas de transporte sustentável antes de sua implementação física, permitindo que gestores antecipem as reações comportamentais dos usuários diante de diferentes cenários de intervenção.

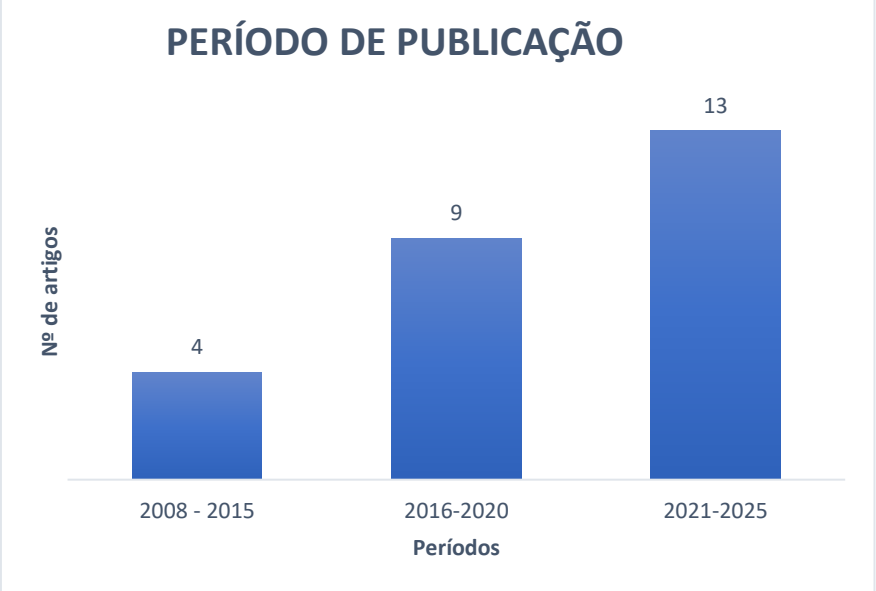


Figura 2: Evolução temporal do portfólio de artigos selecionados.
Fonte: Próprio autor (2026).

No que se refere à distribuição geográfica dos estudos, observa-se uma forte concentração da produção científica em potências globais de tecnologia e inovação. Conforme detalhado na Figura 03, a China lidera o ranking com 7 artigos publicados, seguida de perto pelos Estados Unidos, com 6 registros. Somados, esses dois países representam metade do portfólio analisado, refletindo o alto investimento em pesquisas que integram ciência de dados e planejamento urbano. O restante da amostra apresenta uma distribuição pulverizada, com um artigo para cada um dos demais países identificados, incluindo nações europeias como Alemanha, França, Portugal e Reino Unido, além de contribuições da Oceania (Austrália) e América do Norte (Canadá). Essa diversidade, embora minoritária em números absolutos, é fundamental para demonstrar a versatilidade da Modelagem Baseada em Agentes em diferentes contextos socioculturais e infraestruturas viárias.



Figura 3: Distribuição dos artigos selecionados por país de origem.
Fonte: Próprio autor (2026).

No que concerne às plataformas computacionais empregadas, a Figura 04 revela uma diversidade de ferramentas para a implementação dos modelos, com destaque para o desenvolvimento de soluções customizadas. Observa-se que 11 dos artigos analisados optaram pela criação de um modelo ABM próprio, adaptado às especificidades de suas pesquisas, enquanto softwares consolidados como o NetLogo e o MATSim foram utilizados em 5 e 4 estudos, respectivamente. Já a categoria denominada "Outros" engloba 6 diferentes softwares distintos, indicando que, embora existam plataformas líderes, o campo ainda carece de uma padronização universal, permitindo a exploração de ferramentas variadas conforme a necessidade do pesquisador. Essa pluralidade técnica reforça a maturidade da Modelagem Baseada em Agentes como um método flexível e capaz de se integrar a diferentes fluxos de trabalho e arquiteturas de dados.

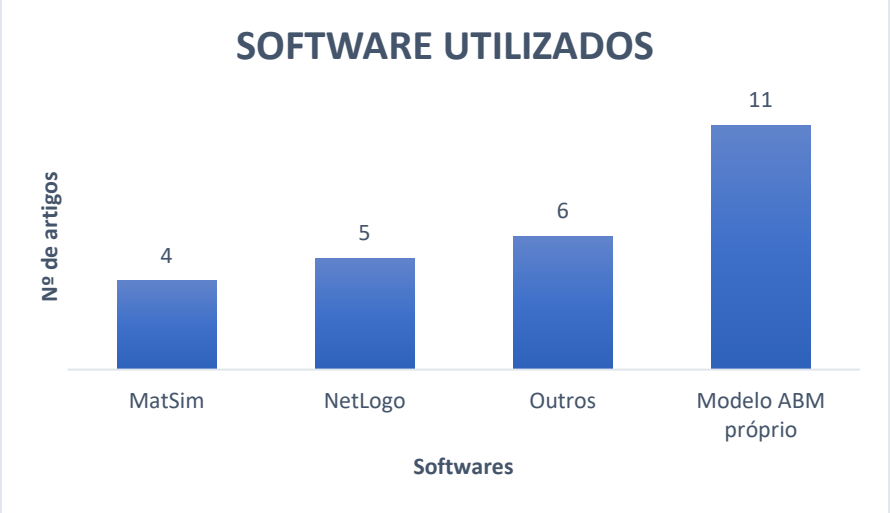


Figura 4: Softwares de simulação identificados na literatura.
Fonte: Próprio autor (2026).

Analisando às estratégias de intervenção simuladas, a Figura 05 evidencia uma clara tendência da literatura científica em direção a abordagens integradas de planejamento. Observa-se que a vasta maioria dos estudos analisados (85%) optou por testar cenários que combinam políticas de restrição ao uso do automóvel, conhecidas como medidas *Push*, com incentivos diretos à mobilidade ativa, denominadas medidas *Pull*. Apenas 15% dos artigos focaram exclusivamente em ações de incentivo isoladas, o que sugere um consenso acadêmico de que a mudança de comportamento modal dificilmente ocorre de forma isolada, exigindo um equilíbrio entre o desestímulo ao transporte motorizado individual e a oferta de alternativas viáveis e atrativas. Esta predominância de modelos de "mix de políticas" (*Policy Mix*) ressalta a complexidade da tomada de decisão dos agentes, que avaliam constantemente o custo-benefício e a conveniência de cada modo de transporte disponível em seu ambiente.

No detalhamento das intervenções de caráter restritivo (*Push*), a literatura demonstra um foco predominante em desestímulos financeiros e operacionais ao transporte motorizado individual. As simulações frequentemente abordam o aumento de taxas de estacionamento e a implementação de tarifas de congestionamento como mecanismos para elevar o custo percebido da utilização do automóvel. Somam-se a essas estratégias a criação de zonas de circulação restrita e regimes de rodízio veicular, que buscam limitar fisicamente a oferta de vias. É importante observar que, em muitos modelos de *Policy Mix*, essas restrições são acompanhadas por melhorias na infraestrutura para meios não motorizados e transporte coletivo, contudo, os estudos apontam que a manutenção de uma estrutura de suporte ainda inferior àquela dedicada ao transporte motorizado pode limitar o potencial de migração modal.

Por outro lado, as políticas de incentivo (*Pull*) identificadas concentram-se na valorização das alternativas sustentáveis através da melhoria da experiência do usuário. As intervenções simuladas priorizam a expansão e qualificação das redes cicloviárias e de caminhada, visando não apenas a continuidade dos trajetos, mas também o aumento da sensação de segurança e a redução do tempo total de deslocamento. Além disso, a promoção da intermodalidade surge como uma tendência forte, permitindo que o agente combine diferentes modos de transporte de forma eficiente. O diferencial dessas políticas reside na tentativa de transformar o transporte ativo em uma escolha competitiva e conveniente, reduzindo as barreiras psicológicas e físicas que historicamente favorecem o uso do carro.

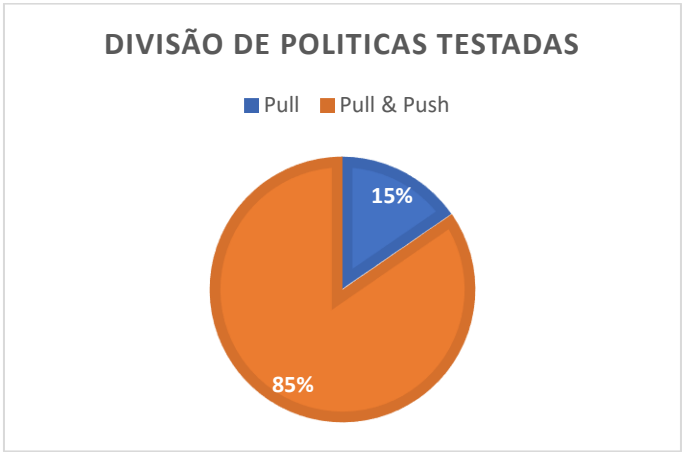


Figura 5: Divisão das políticas de transporte testadas nas simulações. Fonte: Próprio autor (2026).

Por fim, a análise da origem das informações que alimentam as simulações revela uma dependência significativa de bases de dados preexistentes. Como demonstrado na Figura 05, a maioria dos estudos (73%) utiliza dados fornecidos por terceiros, como censos demográficos, pesquisas de origem e destino governamentais ou bancos de dados de aplicativos de transporte, enquanto apenas 27% dos autores realizaram coleta própria de dados primários. Essa disparidade justifica-se pela maior facilidade e menor custo em se obter grandes volumes de informação através de fontes secundárias, permitindo a modelagem de sistemas urbanos complexos em larga escala. No entanto, a literatura pondera que o uso exclusivo de dados de terceiros nem sempre garante a confiabilidade total para cenários específicos, uma vez que tais dados podem estar desatualizados ou carecer de granularidade sobre as motivações subjetivas dos agentes. Em contrapartida, embora a coleta própria exija maior esforço logístico, ela oferece uma compreensão mais precisa e fiel à realidade local investigada, sendo fundamental para validar as premissas de comportamento adotadas no modelo.

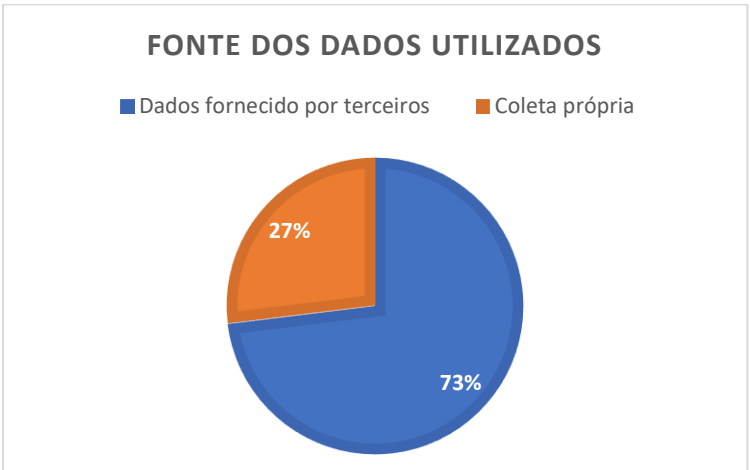


Figura 6: Origem dos dados utilizados nas simulações baseadas em agentes. Fonte: Próprio autor (2026).

Considerações Finais

A revisão sistemática realizada permitiu traçar um panorama sobre o emprego da Modelagem Baseada em Agentes (ABM) no contexto da mobilidade urbana sustentável. Os resultados evidenciam que o campo está em fase de expansão acelerada, com uma produção científica concentrada nos últimos cinco anos e liderada por nações com alto investimento tecnológico. A predominância de modelos que integram estratégias de restrição (*push*) e incentivo (*pull*) confirma que a simulação de agentes é uma ferramenta essencial para capturar a complexidade do comportamento humano, demonstrando que mudanças efetivas nos modos de viagem dependem de um equilíbrio entre desestímulos ao uso do automóvel e a qualificação de alternativas não motorizadas.

Observou-se, ainda, uma dependência significativa de dados secundários nas simulações, o que, embora facilite a modelagem de grandes sistemas, impõe desafios quanto à precisão de cenários locais específicos. Tecnicamente, a flexibilidade de ferramentas como o NetLogo e o uso de modelos customizados destacam-se como caminhos viáveis para pesquisadores que buscam simular interações sociais detalhadas. Em suma, o portfólio de 26 artigos analisados válida a ABM como um método eficaz para o planejamento de políticas de transporte, oferecendo uma base teórica sólida para futuras investigações que busquem otimizar o deslocamento em microcosmos urbanos, como os campus universitários, através de incentivos diretos e infraestruturas integradas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida, bem como ao Laboratório de Engenharia de Transportes do Centro de Tecnologia e Urbanismo (LET-CTU) e à Universidade Estadual de Londrina (UEL) pela infraestrutura fornecida.

Referências Bibliográficas

MASOUD, Abdul Rahman; IDRIS, Ahmed Osman; LOVEGROVE, Gordon. Learning-Based Model for Evaluating the Impact of Neighborhood Design on Travel Behavior. Transportation Research Record, v. 2677, n. 1, p. 843–859, 1 jan. 2023.

ORSI, Francesco; GENELETTI, Davide. Transportation as a protected area management tool: An agent-based model to assess the effect of travel mode choices on hiker movements. Computers, Environment and Urban Systems, v. 60, p. 12–22, 1 nov. 2016.

SAGDIEVA, Maiia; VAN DAM, Koen H.; YANG, Liu. Sustainable Transport Policy Impact Assessment Using Agent-based Modelling: A Case Study in Oxford, UK. In: Association for Computing Machinery, 4 jun. 2025.

SOMMER, Til et al. NoMoTown An agent-based model of transport mode choice. [S.l.: S.n.].

WÖRLE, Tim et al. Modeling intermodal travel behavior in an agent-based travel demand model. In: Elsevier B.V., 2021.

YANG, Yong; DIEZ-ROUX, Ana V. Using an agent-based model to simulate children's active travel to school. International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity, v. 10, 26 maio 2013.

ZELLNER, Moira et al. Overcoming the Last-Mile Problem with Transportation and Land-Use Improvements: An Agent-Based Approach. International Journal of Transportation, v. 4, n. 1, p. 1–26, 30 abr. 2016.

ZENG, Jingjing; LI, Zheng; HENSHER, David A. Travel decision making under uncertainty and road traffic behavior: The multifold role of ambiguity attitude. Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 192, 1 fev. 2025.

ROTAS ACESSÍVEIS NO AMBIENTE URBANO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOB A PERSPECTIVA DA PERCEPÇÃO DO USUÁRIO COM DEFICIÊNCIA

1 Oldair José Pozzobon, 1 Julia Bibiana Zschitschick Souza, 1 Tatiana Cureau Cervo, 1 Alejandro RuizPadillo
1 Laboratório de Mobilidade e Logística, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, Brasil, e-mail: lamot@ufsm.br

Palavras-chave: Mobilidade Urbana; Pessoa com Deficiência; Rotas Acessíveis.

Resumo

A acessibilidade no ambiente constitui um elemento central para a promoção da equidade e da inclusão social, especialmente para Pessoas com Deficiência (PcDs), cuja autonomia é frequentemente limitada por barreiras físicas no ambiente construído. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo sistematizar e analisar criticamente a literatura internacional sobre a definição de rotas acessíveis, com ênfase nas percepções das PcDs acerca das barreiras à mobilidade. Metodologicamente, adota-se uma Revisão Sistemática de Escopo baseada no método ProKnow-C (*Knowledge Development Process–Constructivist*), que possibilitou a identificação, seleção e análise de um portfólio final de 36 artigos científicos. Os resultados evidenciam que as barreiras físicas afetam de forma diferenciada os distintos tipos de deficiência, impactando aspectos como esforço físico, orientação espacial, segurança e carga sensorial. Observa-se que a definição de rotas acessíveis evoluiu de abordagens baseadas na menor distância para modelos multicritério que integram dados geoespaciais, percepção do usuário e tecnologias emergentes, como Sistemas de Informação Geográfica, inteligência artificial e lógica fuzzy. Destaca-se, ainda, o papel de abordagens participativas, como crowdsensing e auditorias colaborativas, na validação e atualização de dados de acessibilidade. Em perspectiva global, identificam-se disparidades significativas entre o Norte e o Sul Global, sendo o primeiro caracterizado por infraestrutura consolidada e uso intensivo de tecnologias, enquanto o segundo enfrenta limitações estruturais que restringem a implementação de soluções avançadas, embora apresente iniciativas adaptativas baseadas na participação social. Conclui-se que a incorporação da percepção das PcDs, aliada à consideração das desigualdades espaciais, é fundamental para o desenvolvimento de modelos de rotas acessíveis mais inclusivos, eficientes e alinhados aos princípios da equidade no planejamento urbano.

Introdução

O ambiente construído é determinante para a mobilidade inclusiva e sustentável, impactando diretamente a equidade de acesso e a eficiência dos sistemas de transporte urbano (Antipova et al., 2020; Bridge, 2025). Nesse contexto, a equidade espacial emerge como um desdobramento direto da distribuição desigual de infraestruturas urbanas e da presença de barreiras físicas, que impõem restrições desproporcionais às Pessoas com Deficiência (PcDs) (Amorim et al., 2025; Pereira et al., 2016). Sob essa perspectiva, a promoção da mobilidade acessível deve estar ancorada nos princípios do desenho universal, de modo a assegurar condições de autonomia, segurança e dignidade no uso do espaço público (Ramírez-Saiz et al., 2025).

A evolução do conceito de deficiência deslocou-se de uma abordagem estritamente médica para o modelo social, no qual o ambiente é compreendido como principal fonte de restrição (OMS, 1980; Pereira et al., 2016). Nessa linha de análise, a deficiência resulta da interação entre limitações funcionais e barreiras físicas do meio (OMS, 1980). Consequentemente, a presença de calçadas irregulares, rampas inadequadas e ausência de sinalização tátil evidencia a insuficiência da infraestrutura urbana frente à diversidade humana (OMS; Banco Mundial, 2011; Froehlich et al., 2022). Nesse sentido, tais obstáculos afetam diferentes perfis de usuários de formas distintas, exigindo que cidades inclusivas eliminem barreiras para permitir a participação socioeconômica plena (Litman, 2007; Duri; Luke, 2025).

Nesse contexto, o conceito de rotas acessíveis ultrapassa a identificação isolada de obstáculos, priorizando a continuidade, segurança e usabilidade do trajeto. Sua definição pode ser aprimorada pela integração entre dados geoespaciais e percepções subjetivas dos usuários (Soares Müller et al., 2024). Enquanto barreiras físicas afetam sobretudo a mobilidade motora e visual, deficiências auditivas e cognitivas enfrentam desafios comunicacionais e perceptivos, demandando abordagens metodológicas específicas (Ruiz-Padillo et al., 2018; Arzal Tahir, 2024).

Em perspectiva global, as estratégias de acessibilidade variam conforme o contexto socioeconômico regional. O Norte Global apresenta arcabouço normativo consolidado, como o *Americans with Disabilities Act* (ADA), associado ao uso intensivo de tecnologias, enquanto o Sul Global, de modo geral, enfrenta desafios estruturais que exigem soluções adaptativas e resilientes. Nesses contextos, a limitada disponibilidade de recursos, como pisos táteis e rampas adequadas, intensifica as dificuldades de deslocamento (Aghaabbasi et al., 2018; Kasemsuppakorn et al., 2015). Essa desigualdade infraestrutural restringe a mobilidade urbana e reforça a necessidade de estratégias que promovam cidadania inclusiva e equitativa no espaço público (García Mora et al., 2021; UNDP, 2010).

Apesar dos avanços observados, ainda há limitações na literatura quanto à compreensão das rotas acessíveis como unidades integradas de análise da equidade, especialmente no que se refere à incorporação das percepções das PcDs no planejamento urbano. Essa lacuna evidencia a necessidade de abordagens que articulem infraestrutura, experiência do usuário e contexto socioespacial.

Assim, o objetivo deste artigo é sistematizar e analisar criticamente a literatura internacional sobre a definição de rotas acessíveis, focando nas percepções das PcDs sobre barreiras físicas. O estudo identifica tipologias de obstáculos, métodos de

mapeamento, representação em modelos de rotas e políticas de mitigação. Inovando ao combinar a percepção do usuário como variável primária e adotar uma perspectiva comparativa entre Norte e Sul Global, esta pesquisa apoia práticas de mobilidade inclusiva e a incorporação da equidade na gestão de infraestruturas urbanas.

Materiais e Métodos

A revisão da literatura constitui etapa essencial para a compreensão aprofundada do tema e para a fundamentação teórica da pesquisa. Com vistas à construção de um referencial consistente, esta Revisão Sistemática de Escopo foca em estudos teóricos e empíricos sobre rotas acessíveis para PcD. Adota-se o método ProKnow-C (*Knowledge Development Process–Constructivist*) (De Carvalho et al., 2020), que possibilita a identificação e seleção sistemática de estudos com base em critérios definidos. Sua aplicação contribui para reduzir vieses associados à priorização de publicações recentes, assegurando um portfólio cientificamente relevante e alinhado ao escopo investigado. O processo foi estruturado em oito fases distintas, apresentadas na Figura 01.

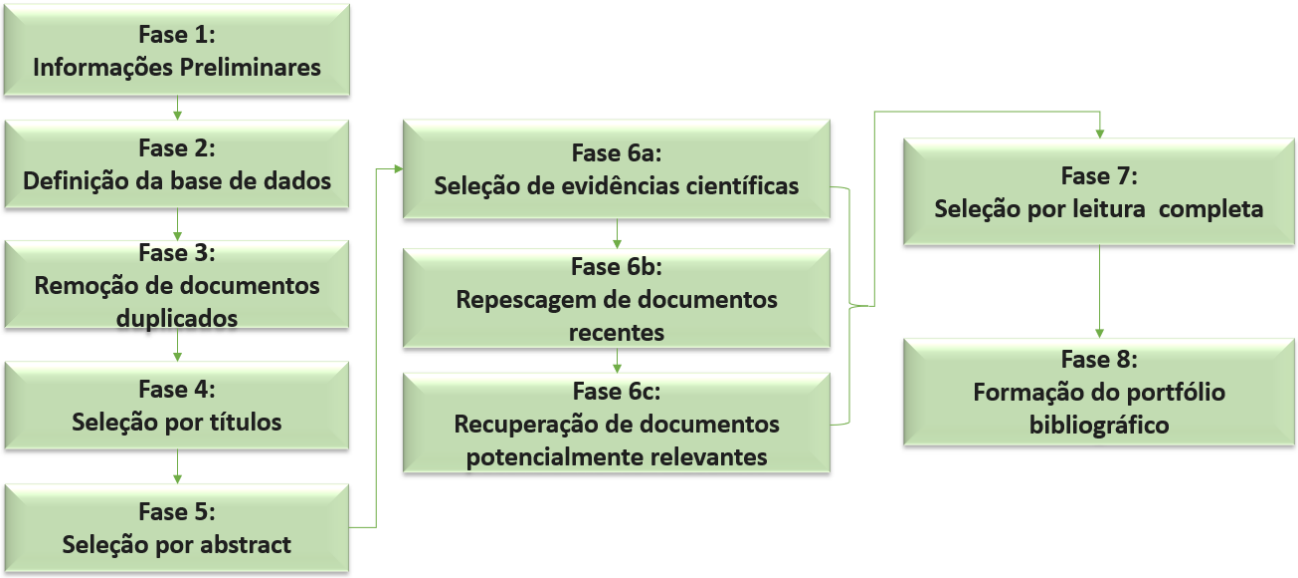


Figura 01: Fluxograma das etapas da metodologia de revisão sistemática de literatura
Fonte: os autores (2026)

Na Fase 1, definiram-se as informações preliminares, estabelecendo o tema "definição de rotas acessíveis para pessoas com deficiência". A estratégia de busca baseou-se na combinação de palavras-chave "(*disability* OR *impairment*) AND (*accessibility* OR *barrier*) AND (*route* OR path OR *pathway*)", visando abranger diferentes deficiências, a superação de barreiras e trajetos de pedestres. A busca restringiu-se às áreas de Engenharia e Ciências Sociais, priorizando o ambiente construído e excluindo estudos clínicos. Foram considerados artigos, revisões e trabalhos de congressos em língua inglesa.

A Fase 2 definiu a plataforma *Scopus* como base de dados principal, devido ao seu reconhecimento global e rigor na indexação de periódicos de alto impacto. O recorte temporal abrangeu os últimos 10 anos (2015–2025). Ao final dessas duas fases iniciais, foram identificados 1.008 documentos. Na Fase 3, utilizou-se a ferramenta *Mendeley* para a exclusão de duplicatas, reduzindo o montante para 1.002 artigos únicos.

O refinamento prosseguiu na Fase 4 com a triagem por títulos, resultando na seleção de 148 estudos diretamente relacionados ao escopo. Na Fase 5, a análise dos resumos permitiu filtrar trabalhos que não operacionalizavam rotas acessíveis ou que fugiam da interface com o planejamento urbano, restando 64 artigos.

A Fase 6 consistiu na seleção pela relevância científica, subdividida em três etapas: na 6a, os artigos foram organizados pelo número de citações no *Google Scholar*, aplicando-se a regra de Pareto para priorizar aqueles que representavam 85% das citações totais (25 artigos); na 6b, 17 artigos publicados nos últimos dois anos foram reintegrados para evitar a exclusão de tendências emergentes que ainda não tiveram tempo de acumular citações; na 6c, verificou-se a autoria de artigos menos citados para identificar estudos complementares, porém não houve novas incorporações.

Na Fase 7, realizou-se a leitura integral dos 42 artigos remanescentes, avaliando sua contribuição teórica e prática. Foram excluídos 6 estudos que não apresentavam foco direto nas barreiras físicas à mobilidade urbana de pedestres. Por fim, na Fase 8, consolidou-se o portfólio final composto por 36 artigos selecionados. Com base nos procedimentos metodológicos adotados, os resultados a seguir sistematizam os principais achados da literatura analisada.

Resultados

A aplicação da metodologia ProKnow-C resultou na seleção de 36 artigos que compõem o portfólio bibliográfico final. Esses estudos abordam a identificação de barreiras físicas, métodos de mapeamento e análise, bem como políticas de

acessibilidade em rotas urbanas. O conjunto fornece base consistente para examinar as barreiras, os métodos empregados e a configuração de modelos de rotas voltados à mobilidade de Pessoas com Deficiência (PcDs).

Principais barreiras físicas para rotas acessíveis

Os estudos do portfólio evidenciam que a viabilidade de rotas acessíveis para PcDs é fortemente condicionada pelas barreiras presentes na infraestrutura urbana (Figura 02). Os resultados indicam que deficiências estruturais afetam diretamente a continuidade, a segurança e a funcionalidade dos deslocamentos, com impactos mais diretos sobre pessoas com deficiência visual e físico-motora.

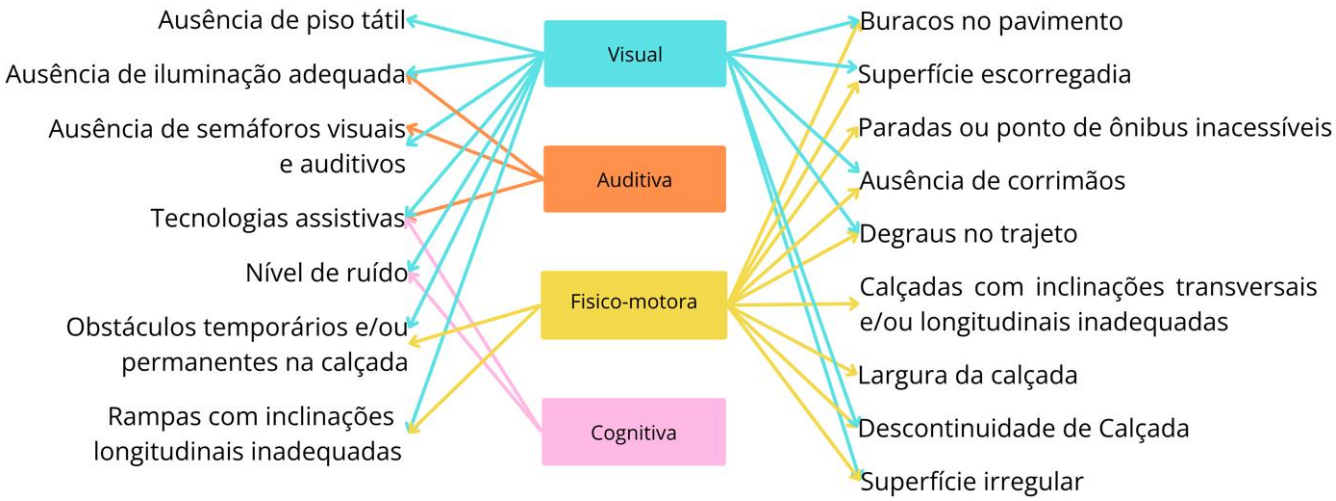


Figura 02. Deficiências e barreiras de acessibilidade em rotas urbanas
Fonte: os autores (2026)

Para a deficiência físico-motora, a literatura identifica obstáculos como rampas inadequadas, escadas sem alternativas acessíveis, degraus elevados e superfícies escorregadias (Kim, 2016; Hou; Ai, 2020; Achillas et al., 2023). Também são recorrentes mudanças abruptas de nível, calçadas estreitas, pavimentação irregular e buracos (Bozovic et al., 2024; Alharbi et al., 2024). Tais barreiras restringem o acesso a serviços essenciais e limitam a participação em atividades cotidianas (Gharebaghi et al., 2017).

Na deficiência visual, os resultados evidenciam a insuficiência de recursos de orientação sensorial, como a ausência de pavimentação tátil, faixas de guia e sinalização sonora em cruzamentos (Alnafessah et al., 2016; Zhang et al., 2019; Adi et al., 2024). Observam-se também riscos elevados de acidentes associados à inexistência de corrimãos e à presença de degraus não sinalizados (Liu et al., 2024; Delboni Lomba; Godoy da Silva, 2023). Adicionalmente, o ruído urbano compromete a eficácia de tecnologias assistivas auditivas, enquanto a iluminação inadequada afeta usuários com baixa visão (Franco et al., 2023).

Embora menos representadas na literatura, as deficiências auditivas e cognitivas apresentam demandas específicas. Para o primeiro grupo, a carência de sinalização visual e de alertas luminosos em semáforos compromete a segurança no deslocamento (Isazade, 2023; Arzal Tahir, 2024). Para o segundo, ambientes caracterizados por sinalização ambígua, níveis elevados de ruído e cruzamentos complexos geram desorientação e estresse sensorial, afetando a navegação e a autonomia dos usuários (Franco et al., 2023).

A compreensão dessas barreiras físicas estabelece a base para a análise dos métodos utilizados para sua identificação e representação, discutidos a seguir.

Métodos de mapeamento e análise de barreiras

Os métodos identificados integram abordagens multidisciplinares para o mapeamento da infraestrutura. Destacam-se o uso de questionários e estatística descritiva para aferir percepções subjetivas (Bezyak et al., 2017), bem como a técnica de "entrevista itinerante" (wheeling interview), que combina rastreamento por GPS e coleta audiovisual para a transcrição de barreiras em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (Prescott et al., 2021). Adicionalmente, utilizam-se inspeções diretas, registros fotográficos e auditorias técnicas fundamentadas em regulamentações para validar a conformidade física da infraestrutura (Liu et al., 2024; Özdemir, 2025).

No âmbito tecnológico, os estudos reportam o uso de LiDAR e SLAM para a captura de dados volumétricos em tempo real, permitindo o mapeamento detalhado da infraestrutura urbana (Gilart-Iglesias et al., 2015; Kim, 2016). Observa-se ainda a aplicação de inteligência artificial, especialmente redes neurais convolucionais, como PointNet++ e YOLOv8, na segmentação de obstáculos em nuvens de pontos 3D, vídeos e inspeções por aplicativos (Hou; Ai, 2020; Chakravarty; Choudhary, 2023). Os Sistemas de Informação Geográfica atuam como núcleo integrador dessas abordagens, incorporando Análise de Decisão Multicritério, geoestatística e a segmentação da rede de calçadas, o que possibilita a modelagem e a otimização de rotas acessíveis (Alzouby et al., 2019; Santana-Santana et al., 2020).

Adicionalmente, destacam-se abordagens participativas, como crowdsensing, workshops e grupos focais, associadas à Lógica Fuzzy e ao Índice de Satisfação do Cliente para tratar incertezas e avaliar a qualidade percebida das rotas (Kasemsuppakorn et al., 2015; Adi et al., 2024).

Integração de barreiras físicas em modelos de rotas acessíveis

Os modelos contemporâneos de roteamento evoluíram para além da menor distância, incorporando dados geoespaciais e algoritmos (como Dijkstra) para propor trajetos personalizados conforme as limitações funcionais e as necessidades específicas dos usuários (Rodriguez-Sanchez; Martinez-Romo, 2017). A integração de tecnologias como RFID e RTLS permite o ajuste dinâmico dessas rotas em tempo real, respondendo à posição variável do usuário, às condições contextuais do ambiente urbano e a obstáculos temporários (Alnafessah et al., 2016). Para lidar com a imprecisão das condições das calçadas, variáveis como inclinação e largura são frequentemente ponderadas via lógica fuzzy, o que permite calcular índices de confiança que refletem melhor a percepção de esforço do pedestre e sua experiência de deslocamento (Gharebaghi et al., 2017; Alzouby et al., 2019). Iniciativas colaborativas, como o Project Sidewalk, representam um avanço na escala de mapeamento ao permitir a identificação e validação de obstáculos físicos por meio de imagens do Google Street View, associadas à participação ativa de usuários e complementadas por técnicas de aprendizado de máquina para apoio à classificação e análise dos dados (Labbé et al., 2023). Além disso, o desenvolvimento de sistemas digitais e aplicativos integrados a plataformas globais como o Google Earth facilita a geração de rotas seguras baseadas em normas internacionais de acessibilidade, como a ADA (Liu et al., 2024; Özdemir, 2025), bem como a incorporação de critérios normativos e operacionais no processo de definição de rotas. Esses modelos sugerem que a eficácia da navegação assistida depende da capacidade de converter características físicas do ambiente em informações úteis, garantindo que o planejamento da rota seja um instrumento de inclusão, autonomia espacial e promoção da equidade no acesso ao espaço urbano.

Impactos e disparidades globais em políticas públicas

As barreiras físicas impactam a autonomia de forma multidimensional: para pessoas com deficiência visual, a carência de referências táteis e sonoras eleva o risco de colisões e desorientação espacial; para cadeirantes, a descontinuidade da malha urbana impõe esforço biomecânico extenuante, aumenta a exposição a obstáculos críticos e a dependência de terceiros (Isazade, 2023; Gharebaghi et al., 2021). Para pessoas com deficiência auditiva e cognitiva, o impacto manifesta-se na previsibilidade do ambiente e na carga sensorial, onde a ausência de sinalização visual clara e interfaces adaptadas compromete a segurança psicológica e a capacidade de navegação autônoma (Rey-Galindo et al., 2020; Franco et al., 2023).

Adicionalmente, de forma geral, os achados revelam uma disparidade crítica entre o Norte e o Sul Global no desenvolvimento de estratégias de acessibilidade. No Norte, as evidências concentram-se em tecnologias assistivas interconectadas, sistemas de monitoramento digitalizados, financiamento perene e dados abertos de alta qualidade (Cohen; Dalyot, 2021; Labbé et al., 2023). Em contrapartida, as ações no Sul Global focam na mitigação de barreiras infraestruturais básicas, como a ausência de calçadas acessíveis e rampas, em contextos de precariedade urbana e restrições orçamentárias (Alzouby et al., 2019; Masal et al., 2024). Embora países como o Brasil possuam marcos regulatórios estabelecidos, como a LBI nº 13.146/2015, os resultados apontam que a aplicação prática é frequentemente limitada pela falta de dados sistematizados e pela incipiente participação das PcDs no planejamento urbano (Delboni Lomba; Godoy da Silva, 2023). Tal heterogeneidade nos achados evidencia a necessidade de modelos que adaptem as tecnologias assistivas globais às especificidades das infraestruturas locais, incorporando a percepção dos usuários como elemento central na formulação de políticas públicas inclusivas.

Discussão

A análise dos estudos selecionados indica que a acessibilidade em rotas urbanas transcende abordagens estritamente técnicas, estando diretamente relacionada às disparidades institucionais e socioeconômicas entre o Norte e o Sul Global, com implicações relevantes para a equidade no ambiente urbano. No Norte Global, normalmente a acessibilidade encontra-se em um estágio consolidado, onde a infraestrutura básica é normativa e perene. Nesses contextos, as barreiras físicas são incidentes ocasionais, geralmente associados à manutenção. Esse cenário permite que a agenda científica avance para o refinamento metodológico, empregando ferramentas de alta complexidade como LiDAR, SLAM e redes neurais convolucionais (PointNet++ e YOLOv8) para a detecção automatizada de obstáculos (Gilart-Iglesias et al., 2015; Kim, 2016; Chakravarty; Choudhary, 2023).

Nesse paradigma de alta tecnologia, o foco reside na criação de modelos dinâmicos baseados em dados em tempo real e algoritmos de grafos, como o clássico Dijkstra. A integração de Lógica Fuzzy e Análise de Decisão Multicritério (MCDA) permite que os modelos de roteamento transcendam a métrica da menor distância, incorporando a percepção de esforço e índices de confiança do pedestre (Gharebaghi et al., 2017; Alzouby et al., 2019). Iniciativas como o Project Sidewalk e o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) como núcleos de integração demonstram que, no Norte, a inovação é impulsionada pela disponibilidade de dados abertos e financiamento contínuo, garantindo que a conformidade com padrões como a ADA seja monitorada sistematicamente (Labbé et al., 2023; Gamache et al., 2019).

Em contrapartida, no Sul Global, as barreiras físicas, como a ausência de calçadas, rampas inadequadas e falhas na pavimentação tátil, constituem obstáculos primários e significativos à mobilidade autônoma (Kasemsuppakorn et al., 2015; Zhang et al., 2019). Nestes cenários, a aplicação de tecnologias de ponta enfrenta a escassez de dados sistematizados. Consequentemente, as metodologias de mapeamento tendem a ser mais diretas, baseando-se em inspeções de campo, registros fotográficos e aplicação de questionários ou checklists (Delboni Lomba; Godoy da Silva, 2023; Masal et al., 2024).

Essa disparidade evidencia uma condição de injustiça espacial: enquanto, de modo geral, o Norte refina soluções, o Sul busca assegurar direitos básicos de mobilidade. No entanto, observam-se iniciativas pontuais de adaptação tecnológica no Sul Global, frequentemente condicionadas por limitações infraestruturais e institucionais, utilizando frameworks como Flutter e metodologias participativas (crowdsensing e workshops) para validar rotas em contextos de infraestrutura precária (Liu et al., 2024; Gamache et al., 2020). Tais abordagens demonstram que a eficácia da navegação depende da capacidade de converter características físicas em informações úteis, mesmo em cenários com restrições tecnológicas, utilizando estratégias adaptativas de comunicação e representação da informação para promover a autonomia dos usuários (Masal et al., 2024).

Um ponto crítico identificado em ambos os contextos é a sub-representação de certas deficiências. Embora os modelos tenham avançado para deficiência física motora e visual, as deficiências auditivas e cognitivas permanecem marginalizadas nas políticas públicas e nos modelos de rota (Bezyak et al., 2017; Asiedu-Ampem et al., 2024). A carência de interfaces com sinalização visual clara e alertas hápticos demonstra que a acessibilidade ainda carece de uma visão multidimensional (Franco et al., 2023), o que limita avanços mais amplos em termos de equidade.

Nesse contexto, a promoção da equidade urbana tende a depender menos da difusão tecnológica isolada e mais da valorização das percepções das PcDs, em consonância com os resultados que evidenciam limitações estruturais no Sul Global. O descompasso entre o desenvolvimento no Norte e as carências no Sul sugere que soluções de ponta nem sempre apresentam aplicabilidade direta sem adaptação ao contexto local. Assim, a acessibilidade pode ser analisada como um processo de justiça social, no qual a integração entre tecnologia, participação social e a garantia de infraestruturas padronizadas assume papel central (Pereira et al., 2016; Amorim et al., 2025).

Considerações finais

Esta Revisão Sistemática da Literatura (RSL) confirma que a integração das percepções das PcDs às barreiras físicas e à modelagem de rotas é essencial para operacionalizar a equidade espacial e apoiar políticas públicas inclusivas. A análise revelou uma disparidade crítica entre o Norte e o Sul Global: enquanto no primeiro prevalecem infraestruturas padronizadas e alta integração de tecnologias digitais, no segundo persistem barreiras físicas básicas e escassez de dados sistematizados. Esse cenário de injustiça espacial no Sul Global reforça a necessidade de investimentos urgentes em pesquisa e infraestrutura para garantir a viabilidade de rotas acessíveis em contextos de precariedade urbana, com foco na promoção de maior equidade no acesso ao espaço urbano.

Identificou-se ainda uma assimetria temática na literatura, que concentra esforços nas deficiências físico-motoras e visuais, negligenciando as necessidades auditivas e cognitivas. A ausência de metodologias participativas robustas, especialmente no Sul Global, compromete a aplicabilidade prática das soluções propostas. Os achados demonstram que, sem incorporar a perspectiva do usuário como fonte primária de dados e validação, os modelos de acessibilidade falham em responder à multidimensionalidade da experiência humana no ambiente construído.

Por fim, conclui-se que o avanço para cidades socialmente justas depende de pesquisas que considerem as especificidades locais e a diversidade das deficiências em interação com o meio urbano. As implicações práticas deste estudo orientam gestores e planejadores a priorizarem investimentos em infraestruturas inclusivas e projetos técnicos adaptados às reais necessidades das PcDs. Superar o descompasso entre as soluções tecnológicas globais e as realidades locais é, portanto, o caminho fundamental para assegurar a autonomia espacial e a equidade no planejamento urbano.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq (Processos 305384/2025-2 e 138253/2025-0) e da CAPES (Processo 88887.002592/2024-00).

Referências

ACHILLAS, C.; AIDONIS, D.; TSOLAKIS, N.; TSAMPOULATIDIS, I.; MOUROUZIS, A.; BIALAS, C.; KORITSOGLOU, K. Auditing Accessibility of Pavements and Points of Interest in Urban Areas: The ‘Seek; Go’ Tool. **Signals**, v. 4, n. 3, p. 604–616, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/signals4030032.

ADI, H. P.; HEIKOOP, R.; WAHYUDI, S. I. Enhancing Inclusivity: Designing Disability Friendly Pedestrian Pathways. **International Journal of Safety and Security Engineering**, v. 14, n. 3, p. 691–699, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.18280/ijsse.140303.

AGHAABBASI, M.; MOEINADDINI, M.; ASADI-SHEKARI, Z.; SHAH, M. Z.; KARIM, M. R. Evaluating the capability of walkability audit tools for assessing sidewalks. **Sustainable Cities and Society**, v. 37, p. 475–484, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.12.001.

ALHARBI, F.; ALSHAMMARI, A.; ALMOSHAOGEH, M.; JAMAL, A.; HAIDER, H. User Perception-Based Optimal Route Selection for Vehicles of Disabled Persons in Urban Centers of Saudi Arabia. **Applied Sciences**, v. 14, n. 22, 10289, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/app142210289.

ALNAFESSAH, A.; AL-AMMAR, M.; AL-HADHRAMI, S.; AL-SALMAN, A.; AL-KHALIFA, H. Developing an ultra wideband indoor navigation system for visually impaired people. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 12, n. 7, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1177/155014776152342.

ALZOUBY, A. M.; NUSAIR, A. A.; TAHA, L. M. GIS based Multi Criteria Decision Analysis for analyzing accessibility of the disabled in the Greater Irbid Municipality Area, Irbid, Jordan. **Alexandria Engineering Journal**, v. 58, n. 2, p. 689–698, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.05.015.

AMORIM, J. M.; SILVA, J. A.; GONÇALVES, J. M. Equity and Spatial Justice Perspectives in Transportation. **Urban Science**, v. 9, n. 5, p. 163, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/urbansci9050163.

ANTIPOVA, A.; SULTANA, S.; HU, Y.; RHUDY JR., J. P. Accessibility and transportation equity. **Sustainability**, v. 12, n. 9, 3611, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su12093611.

ASIEDU-AMPEM, G.; DANSO, A. K.; AYARKWA, J.; OBENG-ATUAH, D.; TUDZI, E. P.; AFFUL, A. E. Barriers to accessibility of urban roads by persons with disabilities: A review of the literature. **Journal of Transport & Health**, v. 39, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jth.2024.101935.

BEZYAK, J. L.; SABELLA, S. A.; GATTIS, R. H. Public Transportation: An Investigation of Barriers for People With Disabilities. **Journal of Disability Policy Studies**, v. 28, n. 1, p. 52–60, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1177/1044207317702070.

BOZOVIC, T.; HINCKSON, E.; STEWART, T.; SMITH, M. How street quality influences the walking experience: an inquiry into the perceptions of adults with diverse ages and disabilities. **Journal of Urbanism**, v. 17, n. 1, p. 111–136, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1080/17549175.2021.2005121.

BRASIL. **Estatuto da pessoa com deficiência**. 3. ed. Brasília: Senado Federal, 2019.

BRIDGE, G. Equitable mobility: enhancing walkability and rollability for inclusive and healthy communities. **Cities & Health**, Routledge, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1080/23748834.2025.2468016.

CHAKRAVARTY, A.; CHOUDHARY, A. Mobility Assistance for the Visually Impaired in Unstructured Environment. *In*: **2023 International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI)**. New Delhi, India: IEEE, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1109/SOLI60636.2023.10425228.

COHEN, A.; DALYOT, S. Route planning for blind pedestrians using OpenStreetMap. **Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science**, v. 48, n. 6, p. 1511–1526, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1177/2399808320933907.

DE CARVALHO, G. D. G.; SOKULSKI, C. C.; DA SILVA, W. V.; DE CARVALHO, H. G.; DE MOURA, R. V.; DE FRANCISCO, A. C.; DA VEIGA, C. P. Bibliometrics and systematic reviews: A comparison between the Proknow-C and the Methodi Ordinatio. **Journal of Informetrics**, v. 14, n. 3, 101043, ago. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.joi.2020.101043.

DELBONI LOMBA, L. F.; GODOY DA SILVA, J. Informed search algorithm for route optimization for visually impaired people: possibility of intelligent assistive technology. **Journal of Location Based Services**, v. 17, n. 2, p. 79–94, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1080/17489725.2022.2104396.

DURI, B.; LUKE, R. Service Quality Barriers Encountered in Urban Public Transport by People with Disability in South Africa. **Social Sciences**, v. 14, n. 6, p. 366, 10 jun. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/socsci14060366.

FRANCO, M.; GAGGI, O.; MERZOUGUI, S. E.; PALAZZI, C. E. Accessible Wayfinding for the Visually Impaired through Sustainable Smartphone Based Sensing. *In*: **2023 IEEE Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)**. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1109/CCNC51644.2023.10059763.

FROEHLICH, J. E.; EISENBERG, Y.; HOSSEINI, M.; MIRANDA, F.; ADAMS, M.; CASPI, A.; DIETERICH, H.; FELDNER, H.; GONZALEZ, A.; GYVES, C. de; HAMMEL, J.; KIRKHAM, R.; KNEISEL, M.; LABBÉ, D.; MOONEY, S. J.; PINEDA, V.; PINHÃO, C. F.; RODRÍGUEZ, A.; SAHA, M.; SAUGSTAD, M.; SHANLEY, J.; SHARIF, A.; SHEN, Q.; SILVA, C. T.; SUKEL, M.; TOKUDA, E. K.; ZAPPE, S. F.; ZIVARTS, A. The Future of Urban Accessibility for People with Disabilities: Data Collection, Analytics, Policy, and Tools. *In*: INTERNATIONAL ACM SIGACCESS CONFERENCE ON COMPUTERS AND ACCESSIBILITY, 24., 2022, Athens, Greece. **Proceedings [...]**. New York: Association for Computing Machinery, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1145/3517428.3550402.

GAMACHE, S.; ROUTHIER, F.; MORALES, E.; VANDERSMISSEN, M.-H.; BOUCHER, N. Mapping review of accessible pedestrian infrastructures for individuals with physical disabilities. **Disability and Rehabilitation: Assistive Technology**, v. 14, n. 4, p. 410–422, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1080/17483107.2018.1449018.

GAMACHE, S.; ROUTHIER, F.; MORALES, E.; VANDERSMISSEN, M.-H.; BOUCHER, N.; MCFADYEN, B. J.; NOREAU, L. Methodological Insights into the Scientific Development of Design Guidelines for Accessible Urban Pedestrian Infrastructure. **Journal of Urban Technology**, v. 27, n. 1, p. 87–105, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1080/10630732.2019.1632677.

GARCÍA MORA, M. E.; SCHWARTZ ORELLANDA, S.; FREIRE, G. **Disability Inclusion in Latin America and the Caribbean**: A Path to Sustainable Development. Washington, DC: World Bank Group, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1596/36354.

GHAREBAGHI, A.; MOSTAFAVI, M.-A.; EDWARDS, G.; FOUGEYROLLAS, P.; MORALES-COAYLA, P.; ROUTHIER, F.; LEBLOND, J.; NOREAU, L. A. Confidence-based approach for the assessment of accessibility of pedestrian network for manual wheelchair users. *In*: PETERSON, Michael P. (org.). **Advances in Cartography and GIScience**. Cham: Springer, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-57336-6_32.

GILART-IGLESIAS, V.; MORA, H.; PÉREZ-DELHOYO, R.; GARCÍA-MAYOR, C. A computational method based on radio frequency technologies for the analysis of accessibility of disabled people in sustainable cities. **Sustainability**, v. 7, n. 11, p. 14935–14963, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su71114935.

HOU, Q.; AI, C. A network-level sidewalk inventory method using mobile LiDAR and deep learning. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 119, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102772.

ISAZADE, V. Advancement in navigation technologies and their potential for the visually impaired: a comprehensive review. **Spatial Information Research**, v. 31, n. 5, p. 547–558, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s41324-023-00492-5.

KASEMSUPPAKORN, P.; KARIMI, H. A.; DING, D.; OJEDA, M. A. Understanding route choices for wheelchair navigation. **Disability and Rehabilitation: Assistive Technology**, v. 10, n. 3, p. 198–210, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.3109/17483107.2014.898160.

KIM, E. Y. Wheelchair navigation system for disabled and elderly people. **Sensors**, v. 16, n. 11, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.3390/s16111806.

LABBÉ, D.; EISENBERG, Y.; SNYDER, D.; SHANLEY, J.; HAMMEL, J. M.; FROEHLICH, J. E. Multiple-Stakeholder Perspectives on Accessibility Data and the Use of Socio-Technical Tools to Improve Sidewalk Accessibility. **Disabilities**, v. 3, n. 4, p. 621–638, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/disabilities3040040.

LITMAN, T. **Evaluating Transportation Equity**: Guidance for Incorporating Distributional Impacts in Transportation Planning. Victoria: Victoria Transport Policy Institute, jan. 2007. Disponível em: https://www.vtpi.org/equity.pdf.

LIU, Z.; JAMIL, E.; SAWADENGDIST, A.; HUI, X.; KALAI, K.; TANG, L. Delivering an inclusive built environment for students with disabilities in a Malaysian public university. **Qualitative Research Journal**, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1108/QRJ-07-2024-0157.

MASAL, K. M.; BHATLAWANDE, S.; SHINGADE, S. D. Development of a visual to audio and tactile substitution system for mobility and orientation of visually impaired people: a review. **Multimedia Tools and Applications**, v. 83, n. 7, p. 20387–20427, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11042-023-16355-0.

NAHDATUNNISA, N.; TAHIR, M. A. Assessing the performance of the pedestrian path accessibility standards for people with disabilities. **Sinergi**, v. 28, n. 3, p. 669–684, 2024. Disponível em: http://doi.org/10.22441/sinergi.2024.3.022.

ÖZDEMIR, H. Developing accessible routes in historic environments for wheelchair users using a smart mobile application. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 16, n. 1, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.103240.

PEREIRA, R. H. M.; SCHWANEN, T.; BANISTER, D. Distributive justice and equity in transportation. **Transport Reviews**, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1257660.

PRESCOTT, M.; GARSIDE, N.; MILLER, W. C.; FEICK, R.; BORISOFF, J.; MORTENSON, W. B.; TAN, P. An exploration of the navigational behaviours of people who use wheeled mobility devices in unfamiliar pedestrian environments. **Journal of Transport & Health**, v. 20, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jth.2020.100975.

PRESCOTT, M.; LABBÉ, D.; MILLER, W. C.; BORISOFF, J.; FEICK, R.; MORTENSON, W. B. Factors that affect the ability of people with disabilities to walk or wheel to destinations in their community: a scoping review. **Transport Reviews**, v. 40, n. 5, p. 646–669, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1748139.

RAMÍREZ-SAIZ, A.; BAQUERO LARRIVA, M. T.; JIMÉNEZ MARTÍN, D.; ALONSO, A. Enhancing Urban Mobility for All: The Role of Universal Design in Supporting Social Inclusion for Older Adults and People with Disabilities. **Urban Science**, v. 9, n. 2, 0046, fev. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/urbansci9020046.

REY-GALINDO, J. A.; RIZO-CORONA, L.; GONZÁLEZ-MUÑOZ, E. L.; ACEVES-GONZÁLEZ, C. Environmental information for people with visual impairment in Mexico - or what they need and how they use it. **Applied Ergonomics**, v. 85, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103079.

RODRIGUEZ-SANCHEZ, M. C.; MARTINEZ-ROMO, J. GAWA – Manager for accessibility Wayfinding apps. **International Journal of Information Management**, v. 37, n. 6, p. 505–519, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.05.011.

RUIZ-PADILLO, A.; PASQUAL, F. M.; LARRANAGA URIARTE, A. M.; CYBIS, H. B. B. Application of multi-criteria decision analysis methods for assessing walkability: A case study in Porto Alegre, Brazil. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 63, p. 855–871, 1 ago. 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.07.016.

SANTANA-SANTANA, S. B.; PEÑA-ALONSO, C.; PÉREZ-CHACÓN ESPINO, E. Assessing physical accessibility conditions to tourist attractions. The case of Maspalomas Costa Canaria urban area (Gran Canaria, Spain). **Applied Geography**, v. 125, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102327.

SOARES MÜLLER, A. P.; GOULART DORNELES, V.; RUIZ-PADILLO, A. Fuzzy geostatistical evaluation of micro-scale attributes of sidewalk accessibility: A Brazilian case. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 126, 1 jan. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.104018.

UNDP. **Regional Human Development Report for Latin America and the Caribbean 2010**: Acting on the future: breaking the intergenerational transmission of inequality. San José, C.R.: United Nations Development Programme (UNDP), 2010. Disponível em: https://hdr.undp.org/content/regional-human-development-report-latin-america-and-caribbean-2010.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **International Classification of Impairments, Disabilities, and Handicaps (ICIDH)**: A manual of classification relating to the consequences of disease. Geneva: World Health Organization, 1980.

WORLD HEALTH ORGANIZATION; WORLD BANK. **World Report on Disability 2011**. Geneva: World Health Organization, 2011.

ZHANG, X.; YAO, X.; ZHU, Y.; HU, F. An ARCore based user centric assistive navigation system for visually impaired people. **Applied Sciences**, v. 9, n. 5, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3390/app9050989.

PONDERAÇÃO DE RISCOS EM PASSAGENS EM NÍVEL FERROVIÁRIAS UTILIZANDO O MÉTODO *ANALYTIC HIERARCHY PROCESS* (AHP)

1 Matheus Nobia Alves, 1 Julia Bibiana Zschitschick Souza, 1 Laura Gonçaves Bertagnolli, 1 Vanessa Teresinha Alves, 1 Alejandro Ruiz-Padillo

1 Laboratório de Mobilidade e Logística, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, Brasil, e-mail: lamot@ufsm.br

Palavras-chave: Passagens em nível; Mobilidade urbana; Segurança ferroviária; Análise de risco.

Resumo

A segurança nas passagens em nível rodoferroviárias constitui um dos principais desafios do transporte ferroviário, especialmente em países latino-americanos, onde há limitações estruturais, escassez de dados e problemas de fiscalização. Este estudo tem como objetivo ponderar os riscos associados a essas interseções, considerando três grupos principais: comportamentais, técnicos e físicos. Para isso, aplicou-se o método *Analytic Hierarchy Process*, com base na participação de especialistas da área ferroviária no Brasil. Os resultados indicaram que os riscos comportamentais possuem maior peso na percepção dos especialistas, sendo o desrespeito à sinalização o fator mais crítico para a segurança, seguido pela visibilidade restrita entre os riscos físicos e pela sinalização inadequada entre os técnicos. Esses achados reforçam que, embora aspectos estruturais e tecnológicos sejam essenciais, o comportamento dos usuários é crucial para a prevenção de acidentes. Os resultados obtidos fornecem subsídios para direcionamento de políticas públicas, priorização de investimentos e formulação de estratégias integradas de segurança para as passagens em nível.

Introdução

A crescente complexidade dos sistemas de transporte impõe desafios não apenas de eficiência logística, mas também de segurança operacional (Abioye et al., 2020). No caso da ferrovia, embora seja reconhecida como um modo estratégico para o desenvolvimento econômico e ambientalmente mais sustentável, seu funcionamento depende de interações constantes com a malha rodoviária (Beanland et al., 2018). Essas interfaces, materializadas principalmente nas passagens em nível, representam pontos críticos de risco, pois concentram a sobreposição entre dois fluxos de tráfego distintos e de natureza bastante desigual (Li et al., 2024). Assim, torna-se fundamental compreender as vulnerabilidades associadas a esses pontos de interseção, que representam um dos principais desafios para a segurança no transporte ferroviário (Anagnostopoulos, 2025; Khoudour et al., 2009).

As passagens em nível, pontos de interseção entre as ferrovias e as rodovias, representam um dos principais desafios para a segurança no transporte ferroviário. Elas são áreas de alto risco, onde a combinação de fatores técnicos, físicos e comportamentais aumenta o potencial de acidentes, exigindo uma abordagem integrada para mitigar os riscos e garantir a segurança dos usuários (Rong et al., 2025; Li et al., 2024).

As passagens de nível rodoferroviárias representam uma área crítica não apenas pela sua complexidade estrutural, mas também pelos elevados custos econômicos que os acidentes implicam. Segundo a International Union of Railways (UIC, 2017), esses cruzamentos são responsáveis por cerca de 25% das fatalidades ferroviárias na Europa. Nos Estados Unidos, a Federal Railroad Administration (FRA, 2021) também destaca o impacto financeiro desses incidentes, com perdas que ultrapassam milhões de dólares por acidente. Estudos demonstram que esses acidentes não só causam danos materiais, mas também têm um alto custo humano, com cerca de 300 fatalidades anuais na Europa (ERA, 2020).

Sob a perspectiva da mobilidade urbana, as passagens em nível assumem um papel ainda mais relevante, uma vez que representam pontos de interface direta entre diferentes modos de transporte que compartilham o espaço urbano. Nessas interseções, a convivência entre fluxos rodoviários, ferroviários e, frequentemente, de pedestres, evidencia desafios relacionados à organização do sistema de transportes e à gestão integrada da segurança. Conforme destacado por Beanland et al. (2018) e Read et al. (2021), a complexidade dessas interações está diretamente associada ao comportamento dos usuários e à forma como estes percebem e respondem aos riscos presentes no ambiente de travessia. Nesse sentido, a segurança em passagens em nível ultrapassa a dimensão operacional da ferrovia, inserindo-se em um contexto mais amplo de planejamento urbano e mobilidade, no qual aspectos como acessibilidade, organização viária e comunicação de risco desempenham papel fundamental na redução de conflitos e na promoção de sistemas de transporte mais seguros e eficientes.

Na América Latina, a problemática das passagens em nível apresenta características próprias, marcadas por desafios relacionados à infraestrutura, à gestão da segurança e à escassez de recursos destinados a intervenções (Martinez et al., 2019). Enquanto em países da Europa e da América do Norte observa-se maior padronização e disponibilidade de dados sistematizados, na região latino-americana ainda é frequente a presença de cruzamentos sem dispositivos adequados de proteção, além da carência de programas contínuos de monitoramento e fiscalização (Lin et al., 2023). Essa realidade reforça a necessidade de soluções adaptadas às condições locais. No Brasil, particularmente, a falta de dados sistematizados dificulta uma análise aprofundada, mas sabe-se que as passagens em nível continuam sendo uma das principais causas de acidentes fatais no país (ANTT, 2021).

Ainda, a complexidade desses cruzamentos é intensificada pela interação entre veículos, pedestres e locomotivas, o que torna a gestão da segurança um desafio multifatorial (Beanland et al., 2018; Read et al., 2021). Além disso, a combinação

concomitante e simultânea desses riscos nas passagens em nível dificulta sua gestão e mitigação, já que a literatura especializada não indica claramente a importância relativa entre eles.

Portanto, o objetivo deste estudo é ponderar os riscos nas passagens de nível, identificando aqueles que têm maior impacto na segurança ferroviária, mediante a utilização do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) aplicado às percepções de um painel de especialistas na área. A partir dessa análise, busca-se fornecer diretrizes para o desenvolvimento de soluções eficazes de segurança, direcionadas à mitigação dos riscos mais críticos nessas interseções. Do mesmo modo, a pesquisa contribui para preencher uma lacuna de conhecimento técnico especializado sobre a gestão do modo ferroviário no contexto latino-americano.

Referencial Teórico

A gestão da segurança nas passagens de nível envolve a consideração de diversos riscos técnicos, físicos e comportamentais. Enquanto os riscos técnicos e físicos podem ser avaliados por variáveis objetivas, os riscos comportamentais exigem uma abordagem mais subjetiva, envolvendo a percepção de risco dos usuários. Estudos indicam que a falta de conscientização e os comportamentos inadequados, como a impaciência dos motoristas e pedestres, contribuem significativamente para os acidentes em cruzamentos ferroviários (Larue et al., 2020; Zhang et al., 2022). A integração de tecnologias avançadas, como sistemas automáticos de controle e sinalização, pode ajudar a mitigar esses riscos, mas é igualmente importante a conscientização pública sobre as boas práticas de segurança. No Brasil, a lacuna acadêmica sobre o tema tem dificultado a implementação de políticas públicas eficazes para resolver essas questões (Virga e Marques, 2020).

Os riscos nas passagens de nível, organizados nos três grupos principais (comportamentais, técnicos e físicos), apresentam indicadores específicos que permitem uma avaliação mais precisa da segurança para cada caso (Read et al., 2021). O grupo comportamental inclui os riscos de desrespeito à sinalização, cujo indicador é o índice de infrações de trânsito nesses pontos; a impaciência de motoristas, indicada pela falta de verificação adequada da linha do trem antes do cruzamento; e o excesso de confiança, que é refletido pela desatenção do motorista nas manobras. Esses riscos estão intimamente ligados à interação humana com os sistemas de alerta e sinalização, e são críticos para a ocorrência de acidentes, especialmente quando os motoristas falham em seguir as recomendações de segurança (Larue et al., 2020; Zhang et al., 2022).

Os riscos técnicos, por sua vez, envolvem falhas em sistemas e infraestrutura. O risco de falhas em sinais luminosos e sonoros é indicado pelo estado de funcionamento desses sistemas de alerta. O risco de falhas de manutenção é evidenciado pelo estado do pavimento (superfície, drenagem, etc.), que pode comprometer a funcionalidade dos sistemas de alerta. Outro risco técnico relevante é o de falhas em barreiras móveis, indicado pelo estado das barreiras e cercas, que é fundamental para a segurança nas passagens de nível. Além disso, o risco de sinalização e proteção insuficientes ou inadequadas é associado ao estado das placas fixas e marcas horizontais, que garantem a visibilidade e a clareza das sinalizações (Haleem e Gan, 2015; Li et al., 2024). A relação entre os grupos de risco, os riscos e os seus indicadores estão presentes na Tabela 01.

Grupos de Risco	Riscos	Indicadores
Comportamental	Desrespeito à sinalização	Índice de infrações de trânsito
	Impaciência de motoristas	Falta de verificação da linha do trem
	Excesso de confiança	Desatenção do motorista
Técnico	Falhas em sinais luminosos e sonoros	Estado dos sinais automáticos luminosos e sonoros
	Falhas de manutenção	Estado do pavimento (superfície, drenagem...)
	Falhas em barreiras móveis	Estado das barreiras e cercas
	Sinalização e proteção insuficientes ou inadequadas	Estado das placas fixas e marcas horizontais
Físico	Obstruções na via	Detecção de obstáculos no cruzamento
	Geometria inadequada	Afastamento da via ferroviária da rodovia
		Altura do perfil do cruzamento (*Hump Crossing*)
		Rampa
		Ângulo entre a via e a ferrovia
	Iluminação local inadequada	Condições de iluminação
	Visibilidade restrita	Distância de visibilidade

Tabela 01: Relação de indicadores propostos para avaliação de risco em passagens em nível.
Fonte: Os Autores

Por fim, os riscos físicos envolvem características estruturais e ambientais das passagens de nível. O risco de obstruções na via é indicado pela detecção de obstáculos no cruzamento, que pode bloquear a passagem segura. A geometria inadequada, que inclui o afastamento da via ferroviária da rodovia, a altura do perfil do cruzamento (*Hump Crossing*), a rampa e o ângulo entre a via e a ferrovia, são indicadores críticos para a avaliação do tempo de reação dos motoristas e da visibilidade dos sinais.

O risco de iluminação local inadequada é refletido pelas condições desses elementos no ponto de cruzamento, que comprometem a visibilidade nas travessias, enquanto o risco de visibilidade restrita é indicado pela distância de visibilidade, que pode dificultar a percepção do trem à distância, aumentando o risco de acidentes (Laapotti, 2016; Singh et al., 2022).

Essa classificação dos riscos e seus indicadores permite uma análise detalhada e uma gestão mais eficaz das passagens de nível, destacando a importância de estratégias que integrem os aspectos comportamentais, técnicos e físicos para garantir a segurança nas travessias ferroviárias.

Materiais e Métodos

O Método AHP, desenvolvido por Thomas L. Saaty em 1970, é uma técnica de agregação completa amplamente utilizada para tomada de decisão multicritério, estruturando problemas complexos em níveis hierárquicos que incluem objetivos, critérios, subcritérios e alternativas (Saaty, 1990). Sua aplicação baseia-se na comparação pareada entre critérios e alternativas, permitindo definir pesos relativos que refletem a importância de cada elemento no processo decisório.

Esse método, amplamente utilizado em análises multicritério, mostrou-se adequado para estruturar os grupos de risco e seus indicadores, permitindo comparações paritárias que resultaram em pesos relativos de acordo com a percepção dos especialistas participantes. Para a coleta de dados, foi elaborado um questionário estruturado em 66 sessões sequenciais, concebidas a partir de fluxos condicionais que direcionavam cada respondente apenas para as etapas pertinentes às escolhas previamente realizadas. Dessa forma, o percurso de respostas foi individualizado, assegurando que cada participante realizasse apenas julgamentos compatíveis com sua própria percepção de relevância.

O questionário foi aplicado a especialistas da área, incluindo pesquisadores, gestores e técnicos com experiência prática e teórica na gestão de segurança em passagens de nível. Essa seleção buscou reunir diferentes perspectivas profissionais, garantindo robustez e diversidade de julgamentos. As instruções iniciais apresentavam os objetivos do estudo, a estrutura do questionário e os três grupos de risco a serem avaliados, assegurando a compreensão prévia dos conceitos. A primeira etapa consistiu na ordenação por importância desses três grupos (físico, técnico e comportamental), de modo que cada participante os classificasse de acordo com sua percepção de relevância. A partir dessa ordenação, que resultava em seis alternativas possíveis, os respondentes eram encaminhados às sessões de comparação por pares correspondentes, nas quais cada grupo era avaliado em relação aos demais.

Em seguida, o questionário direcionava os participantes para a análise dos riscos específicos de cada grupo. O grupo físico incluiu quatro riscos: obstruções na via, geometria inadequada, iluminação local insuficiente e visibilidade restrita. Inicialmente, os especialistas realizaram a ordenação desses quatro riscos, gerando 24 combinações possíveis, e, posteriormente, responderam às comparações por pares, sempre utilizando uma escala de cinco níveis de importância relativa: “extremamente mais importante”, “muito mais importante”, “mais importante”, “um pouco mais importante” e “mesma importância”. Processo semelhante foi adotado para o grupo técnico, que abrangeu os riscos: falhas em sinais luminosos e sonoros, falhas de manutenção, falhas em barreiras móveis e sinalização e proteção insuficientes ou inadequadas. Também nesse caso, os participantes realizaram uma ordenação inicial, seguida das comparações paritárias entre os critérios. O mesmo procedimento foi aplicado ao grupo comportamental, composto pelos riscos relacionados ao desrespeito à sinalização, à impaciência dos motoristas e ao excesso de confiança no momento da travessia.

Ao final do percurso, todos os participantes foram conduzidos para a sessão de caracterização, destinada à coleta de informações demográficas e profissionais, incluindo idade, gênero, unidade federativa, grupo de atuação e tempo de experiência. Essas informações complementares possibilitaram contextualizar os resultados obtidos e realizar análises comparativas entre diferentes perfis de especialistas. É importante destacar que, devido ao uso de fluxos condicionais, cada respondente percorreu um caminho exclusivo dentro do questionário, respondendo a um total de oito sessões além da caracterização final, o que assegurou consistência metodológica e maior aderência das respostas às percepções individuais.

O cálculo dos pesos dos critérios inicia-se com a construção da matriz de comparação pareada, onde os especialistas atribuíram pesos relativos utilizando a escala de Saaty que contém valores de 1 a 9. A matriz gerada segue a estrutura $A = [a_{ij}]$, onde cada elemento representa a importância do critério i em relação ao critério j (Saaty e Vargas, 2022). A seguir, o conjunto de pesos dos critérios (w_i) é obtido a partir da normalização do autovetor principal da matriz. Para verificar a consistência dos julgamentos, o método utiliza o cálculo do denominado Índice de Consistência (CI), dado por:

$$CI = \frac{\lambda\_max - n}{n-1} \quad (1)$$

Onde λ_max é o maior autovalor da matriz e n é o número de critérios. O Índice de Consistência Relativa (CR) é então determinado por:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

Onde RI é o Índice Aleatório tabelado, segundo valor de n. Se $CR < 0.1$, a matriz é considerada consistente. Nos casos de n=3, o valor limite de CR é estabelecido em 0.05, enquanto que para n=4 o valor de CR não pode ser maior de 0.08. Caso contrário, os julgamentos devem ser revisados (Saaty, 1990).

Resultados

O questionário AHP contou com 13 especialistas de diversas regiões do Brasil, com maior representatividade no Distrito Federal, São Paulo, Minas Gerais e Paraíba. A amostra incluiu pesquisadores, gestores públicos e técnicos do setor ferroviário, com predominância de profissionais com mais de 8 anos de experiência. Também participaram representantes do Amazonas, Rio Grande do Sul, Goiás, Tocantins e Paraná. Os resultados permitiram obter a ponderação dos riscos identificados na literatura,

tanto em nível individual quanto agrupados em categorias (Tabela 02). Além disso, os valores obtidos de Índice de Consistência Relativa (CR) mostraram a consistência dos resultados, sendo de 0,02% para o nível dos grupos de risco, e de 0,01%, 3,65% e 2,93% para os níveis de risco comportamental, técnico e físico, respectivamente.

Os resultados obtidos para cada grupo de risco indicam que os riscos comportamentais são os mais relevantes para a análise de segurança nas passagens em nível, seguidos pelos riscos técnicos e, por último, pelos riscos físicos. Essa distribuição sugere que a simples presença de equipamentos de segurança nas passagens não é suficiente para garantir a proteção, evidenciando a importância significativa do comportamento dos usuários nos pontos de cruzamento.

Grupos de risco	Peso do grupo	Riscos	Peso dentro do grupo	Peso Final
Comportamental	44,13%	Desrespeito à sinalização	41,14%	18,15%
		Impaciência de motoristas	24,85%	10,96%
		Excesso de confiança	34,02%	15,01%
Físico	26,33%	Visibilidade restrita	37,96%	9,99%
		Geometria inadequada	15,09%	3,97%
		Obstruções na via	26,03%	6,85%
Técnico	29,54%	Iluminação local inadequada	20,92%	5,51%
		Falhas em sinais luminosos e sonoros	25,29%	7,47%
		Falhas de manutenção	26,28%	7,76%
		Falhas em barreiras móveis	21,36%	6,31%
		Sinalização e proteção insuficientes ou inadequadas	27,07%	8,00%

Tabela 02. Pesos obtidos para cada risco presente nas passagens em nível.
Fonte: Os Autores.

Os resultados obtidos por meio da aplicação do método AHP evidenciam uma estrutura clara de priorização dos riscos associados às passagens em nível, com destaque para a predominância dos fatores comportamentais, seguidos pelos técnicos e, por fim, pelos físicos. A amostra de especialistas, composta por 13 profissionais com ampla experiência no setor ferroviário e na gestão pública, apresentou elevada consistência nas respostas, conforme demonstrado pelos baixos valores de consistência relativa (CR), reforçando a confiabilidade dos pesos atribuídos.

No nível agregado, os riscos comportamentais representaram 44,13% do peso total, superando os riscos técnicos (29,54%) e físicos (26,33%). Entre todos os riscos avaliados, o desrespeito à sinalização apresentou o maior peso final (18,15%), seguido pelo excesso de confiança (15,01%) e pela impaciência de motoristas (10,96%). No grupo físico, a visibilidade restrita destacou-se com peso significativo (9,99%), enquanto, no grupo técnico, a distribuição dos pesos mostrou-se mais equilibrada, com leve predominância da sinalização insuficiente ou inadequada (8,00%).

A interpretação desses resultados revela uma forte convergência com o referencial teórico adotado. A predominância dos riscos comportamentais confirma o que já havia sido apontado por Larue et al. (2020) e Zhang et al. (2022), no sentido de que os acidentes em passagens em nível estão fortemente associados à interação humana com o sistema ferroviário, mais do que às falhas estruturais isoladas. Esse achado reforça a ideia de que a segurança nesses pontos não pode ser tratada exclusivamente sob a ótica da engenharia, sendo necessário incorporar dimensões comportamentais e cognitivas dos usuários.

A elevada relevância do desrespeito à sinalização como principal fator de risco sugere que a transgressão deliberada das normas constitui um problema crítico. Esse comportamento pode estar associado a fatores como familiaridade com o local, percepção reduzida de risco ou ausência de fiscalização efetiva. Tal resultado dialoga diretamente com Read et al. (2021), ao indicar que a percepção subjetiva do risco influencia significativamente a tomada de decisão dos condutores. Em termos de mobilidade urbana, esse aspecto ganha ainda mais relevância, pois evidencia que a segurança viária em ambientes urbanos depende não apenas da infraestrutura disponível, mas também da forma como os usuários interagem com ela.

A análise do excesso de confiança como segundo risco mais relevante reforça essa perspectiva. Esse comportamento, frequentemente associado à repetição de trajetos e à subestimação do perigo, pode levar à negligência de sinais de advertência, aumentando a probabilidade de acidentes. Esse fenômeno é particularmente crítico em áreas urbanas, onde a frequência de travessias é maior e a familiaridade dos usuários com o ambiente tende a reduzir a percepção de risco ao longo do tempo.

Por outro lado, a menor relevância atribuída à impaciência de motoristas dentro do grupo comportamental sugere que os especialistas percebem que decisões precipitadas, embora importantes, são menos críticas do que comportamentos deliberadamente inseguros. Essa distinção é relevante do ponto de vista da formulação de políticas públicas, pois indica que estratégias de intervenção devem diferenciar comportamentos impulsivos de comportamentos conscientes de transgressão, exigindo abordagens distintas, como campanhas educativas e medidas de fiscalização mais rigorosas.

No grupo físico, a visibilidade restrita emerge como o principal fator de risco, o que está em consonância com Laapotti (2016) e Singh et al. (2022), que destacam a relação direta entre visibilidade e tempo de reação do condutor. Esse resultado reforça a importância de intervenções voltadas à melhoria das condições de visibilidade, como remoção de obstáculos, adequação do triângulo de visibilidade e controle da ocupação do entorno. Sob a perspectiva da mobilidade urbana, a visibilidade também se relaciona com a organização do espaço urbano e o uso do solo, evidenciando a necessidade de integração entre planejamento urbano e segurança ferroviária.

A baixa relevância atribuída à geometria inadequada pode indicar que, embora seja um fator importante, sua influência é percebida como menos imediata em comparação com outros riscos. Além disso, esse tipo de problema tende a ser mais facilmente corrigido por meio de intervenções de engenharia, o que pode contribuir para sua menor percepção de criticidade. No entanto, essa interpretação deve ser feita com cautela, uma vez que a geometria do cruzamento influencia diretamente outros fatores, como visibilidade e tempo de exposição, podendo atuar de forma indireta no aumento do risco.

No grupo técnico, a distribuição relativamente equilibrada dos pesos sugere que não há um único fator dominante, mas sim um conjunto de elementos que, combinados, influenciam a segurança das passagens em nível. O destaque para a sinalização insuficiente ou inadequada está alinhado com os estudos de Haleem e Gan (2015) e Li et al. (2024), que enfatizam a importância da clareza e da legibilidade das informações fornecidas aos usuários. Esse resultado reforça a necessidade de manutenção contínua da sinalização e da adoção de padrões adequados de visibilidade e posicionamento.

A ausência de um risco técnico com peso expressivamente superior aos demais também pode ser interpretada como um indicativo de que, na percepção dos especialistas, as falhas técnicas isoladas são menos determinantes para a ocorrência de acidentes do que os comportamentos inadequados dos usuários. Esse achado reforça a ideia de que a segurança em passagens em nível é um fenômeno sistêmico, que resulta da interação entre infraestrutura, operação e comportamento humano.

Sob a ótica da mobilidade urbana, os resultados apontam para uma necessidade de integração entre políticas de segurança viária e ferroviária. As passagens em nível representam pontos de conflito entre diferentes modos de transporte, e sua gestão deve considerar não apenas a operação ferroviária, mas também o fluxo urbano, o comportamento dos usuários e a configuração do espaço urbano. Nesse sentido, a priorização de riscos comportamentais indica que estratégias baseadas exclusivamente em infraestrutura são insuficientes, sendo necessário incorporar ações educativas, campanhas de conscientização e mecanismos de fiscalização.

Além disso, a hierarquização dos riscos obtida neste estudo pode contribuir para a alocação mais eficiente de recursos, direcionando investimentos para intervenções com maior potencial de redução de acidentes. Em um contexto de mobilidade urbana sustentável, essa abordagem permite otimizar a segurança sem comprometer a fluidez do sistema, equilibrando a necessidade de proteção com a eficiência operacional.

Por fim, os resultados reforçam a importância de abordagens integradas na gestão de passagens em nível, combinando aspectos técnicos, físicos e comportamentais. A utilização de métodos multicritério, como o AHP, mostra-se adequada para capturar essa complexidade, permitindo uma análise estruturada e fundamentada que pode subsidiar tanto a tomada de decisão quanto o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes.

Considerações Finais

A avaliação dos riscos em passagens em nível rodoferroviárias realizada neste estudo contribui para o avanço metodológico na análise da segurança nesses pontos críticos de interação modal, ao integrar uma abordagem estruturada baseada no método AHP com a percepção qualificada de especialistas do setor. Mais do que a simples hierarquização dos riscos, os resultados evidenciam a natureza sistêmica da segurança em passagens em nível, na qual fatores humanos, técnicos e físicos atuam de forma interdependente.

A predominância dos riscos comportamentais reforça a necessidade de ampliar o enfoque tradicional da engenharia de tráfego e da segurança ferroviária, incorporando de forma mais consistente a dimensão do comportamento dos usuários nas estratégias de mitigação de acidentes. Esse resultado indica que intervenções baseadas exclusivamente em infraestrutura ou tecnologia tendem a apresentar limitações quando não acompanhadas por ações voltadas à conscientização, fiscalização e indução de comportamentos seguros.

Sob a perspectiva da mobilidade urbana, os achados deste estudo evidenciam que as passagens em nível não devem ser tratadas apenas como pontos isolados de risco, mas como elementos integrados ao sistema viário e ao funcionamento das cidades. Nesse contexto, a segurança nesses cruzamentos está diretamente relacionada à organização do espaço urbano, à gestão dos fluxos de tráfego e à qualidade da informação fornecida aos usuários. A relevância de fatores como visibilidade e sinalização reforça a importância de alinhar políticas de segurança ferroviária com diretrizes de planejamento urbano e mobilidade sustentável.

Além disso, a estrutura de pesos obtida oferece subsídios práticos para a priorização de intervenções, permitindo direcionar recursos para ações com maior potencial de impacto na redução de riscos. Essa abordagem pode contribuir para a formulação de políticas públicas mais eficientes, especialmente em contextos de restrição orçamentária, ao apoiar decisões baseadas em evidências e na percepção técnica especializada.

Por fim, destaca-se que futuras pesquisas podem aprofundar a integração entre análise comportamental e modelagem quantitativa de risco, bem como explorar a aplicação dos indicadores propostos em estudos empíricos de campo. A incorporação de dados operacionais e de observação direta pode ampliar a capacidade preditiva dos modelos, fortalecendo a gestão da segurança em passagens em nível e contribuindo para sistemas de mobilidade urbana mais seguros, integrados e resilientes.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq e da CAPES.

Referências Bibliográficas

ABIOYE, O. F. et al. Accident and hazard prediction models for highway–rail grade crossings: a state-of-the-practice review for the USA. *Railway Engineering Science*, v. 28, p. 251–274, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s40534-020-00215-w.

ANAGNOSTOPOULOS, A. Assessing safety and infrastructure design at railway level crossings through microsimulation analysis. *Future Transportation*, v. 5, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/futuretransp5010024.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). Acidentes em passagens de nível: relatório anual 2021. Brasília: ANTT, 2021. Disponível em: https://www.antt.gov.br. Acesso em: 10 fev. 2026.

BEANLAND, V. et al. Challenging conventional rural rail level crossing design: evaluating three new systems thinking-based designs in a driving simulator. *Safety Science*, v. 110, p. 100–114, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.03.002.

EUROPEAN UNION AGENCY FOR RAILWAYS (ERA). Rail safety in the European Union 2020. Valenciennes: ERA, 2020. Disponível em: https://www.era.europa.eu. Acesso em: 10 fev. 2026.

FEDERAL RAILROAD ADMINISTRATION (FRA). Railroad safety statistics annual report 2021. Washington, DC: FRA, 2021. Disponível em: https://railroads.dot.gov. Acesso em: 10 fev. 2026.

HALEEM, K.; GAN, A. Contributing factors of crash injury severity at public highway-railroad grade crossings in the U.S. *Journal of Safety Research*, v. 53, p. 23–29, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsr.2015.03.005.

KHOUDOUR, L. et al. Towards safer level crossings: existing recommendations, new applicable technologies and a proposed simulation model. *European Transport Research Review*, v. 1, p. 35–45, 2009. DOI: https://doi.org/10.1007/s12544-008-0004-z.

LAAPOTTI, S. Comparison of fatal motor vehicle accidents at passive and active railway level crossings in Finland. *IATSS Research*, v. 40, p. 1–6, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2015.12.003.

LARUE, G. S.; BLACKMAN, R. A.; FREEMAN, J. Frustration at congested railway level crossings: how long before extended closures result in risky behaviours? *Applied Ergonomics*, v. 82, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102943.

LI, B. et al. A holistic optimization-based approach for sustainable selection of level crossings for closure with safety, economic, and environmental considerations. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 249, p. 110197, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110197.

LIN, C.-Y. et al. International benchmarking of railroad safety data systems and performance – a cross-continental case study. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, v. 26, p. 100384, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2023.100384.

MARTINEZ, S.; SANCHEZ, R.; YAÑEZ-PAGANS, P. Road safety: challenges and opportunities in Latin America and the Caribbean. *Latin American Economic Review*, v. 28, p. 17, 2019. DOI: https://doi.org/10.1186/s40503-019-0078-0.
READ, G. J. M. et al. What factors influence risk at rail level crossings? A systematic review and synthesis of findings using systems thinking. *Safety Science*, v. 138, p. 105207, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105207.

RONG, C. et al. Analysis on the adjustment of transportation structure and the logistics transformation of railway freight. *Railway Sciences*, v. 4, p. 82–96, 2025. DOI: https://doi.org/10.1108/RS-09-2024-0040.

SAATY, T. L. How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, v. 48, p. 9–26, 1990.

SAATY, T.; VARGAS, L. The Analytic Hierarchy Process. 2022.

SINGH, P. et al. Development of exact and heuristic optimization methods for safety improvement projects at level crossings under conflicting objectives. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 220, p. 108296, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108296.

INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (UIC). Level crossings safety report. Paris: UIC, 2017. Disponível em: https://uic.org/safety/level-crossing-safety. Acesso em: 10 fev. 2026.

VIRGA, T.; MARQUES, T. C. A. South American physical integration in the recent period (2000–2020): status, continuity, inflection, and reversal. *Revista Tempo do Mundo*, n. 23, p. 149–180, 2020. DOI: https://doi.org/10.38116/rtm23art6.

ZHANG, Z. et al. Artificial intelligence-aided railroad trespassing detection and data analytics: methodology and a case study. *Accident Analysis and Prevention*, v. 168, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106594.

MOBILIDADE URBANA E EMISSÕES DE GEE EM FLORIANÓPOLIS: UMA ANÁLISE CRÍTICA DA DEPENDÊNCIA MODAL RODOVIÁRIA COMO EXPRESSÃO DA PRODUÇÃO DO ESPAÇO

1 Ricardo André Mewes Burghardt
1 Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, ricardoamburghardt@gmail.com

Palavras-chave: Mobilidade; Espaço Urbano; Emissão de gases do efeito estufa.

Resumo

Florianópolis desponta como uma das capitais brasileiras que mais cresceram em termos populacionais nos últimos doze anos, conforme dados do Censo Demográfico de 2022. Ao mesmo tempo, o município, localizado predominantemente em uma ilha, enfrenta cotidianamente problemas associados à fragmentação da ocupação urbana, a limitantes ambientais e à imobilidade urbana. Diante desse contexto, o presente artigo tem como objetivo identificar como os modais de transporte — em especial o rodoviário — influenciam na intensificação das emissões de gases do efeito estufa (GEE), bem como compreender como tal processo relaciona-se à produção do espaço urbano e às desigualdades socioespaciais. Para isso, por meio de revisão bibliográfica, buscou-se desenvolver uma fundamentação teórica que parte do pressuposto de que a mobilidade e a produção do espaço são processos resultantes de um modo de produção capitalista hegemônico. Os resultados indicam que a dependência do transporte rodoviário individual, associada à forma urbana dispersa e à ausência de alternativas modais, contribui significativamente para a intensificação das emissões de GEE, ao mesmo tempo em que reforça padrões desiguais de organização do espaço urbano.

Introdução

Florianópolis apresentou um crescimento populacional de 27,5%, passando de 421.240 habitantes, em 2010, para 537.211, em 2022 (IBGE, 2010; 2022). Nesse contexto, torna-se necessário que aspectos como planejamento urbano, oferta de moradia acessível, mobilidade e acessibilidade estejam alinhados às transformações do espaço, especialmente em um município localizado predominantemente em uma ilha, o que impõe uma série de limitações ambientais e geográficas que influenciam diretamente na forma como a cidade se desenvolve.

Considerando o processo histórico de ocupação, inicialmente caracterizado por grandes glebas de terra que foram posteriormente parceladas — o que acentuou a irregularidade fundiária, a dispersão dos núcleos de povoamento e sua fragmentação —, a mobilidade assumiu papel central como condição de acesso ao espaço, em função das necessidades cotidianas de escoamento da produção agrícola e pesqueira. Com as transformações do espaço, o rural tornou-se urbano, e o desenvolvimento engendrou uma nova complexidade de fluxos, que impactou diretamente a mobilidade e a forma como ela se estruturou (Cocco, 2016).

Nessa perspectiva, não há como, em uma primeira leitura, compreender que a mobilidade perpassa a simples concepção do ato de mover-se (Lemos, 2009). No contexto geográfico, a mobilidade pode ser entendida como uma prática social condicionada pela estrutura urbana e pelas relações de poder, que expressa a capacidade diferenciada dos indivíduos de se deslocarem no espaço, definindo, assim, quem pode acessar a cidade e em quais condições (Vasconcellos, 2012).

No contexto de Florianópolis, essa compreensão de mobilidade evidencia-se na predominância do modal rodoviário, sobretudo no transporte individual motorizado, que historicamente orientou a organização do sistema viário e os investimentos em infraestrutura. À vista disso, a priorização do automóvel, em detrimento de alternativas como o transporte coletivo de qualidade, o transporte aquaviário e os modos ativos, contribui para a intensificação dos congestionamentos e para a ampliação das desigualdades no acesso à cidade (Cocco, 2016).

Consequentemente, devido ao uso intenso do automóvel, o município apresenta altos índices de emissões de gases do efeito estufa (GEE), em especial às emissões associadas ao setor de energia, ocasionados pelo transporte motorizado, responsável por 73,1% das emissões totais em 2024 (SEEG, 2024).

Diante do exposto, este artigo tem como objetivo identificar como os modais de transporte contribuem para a intensificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no município, bem como analisar de que forma a mobilidade, enquanto elemento estruturante da produção e da reprodução do espaço, articula-se às desigualdades socioespaciais, configurando-se como expressão das contradições inerentes ao modo de produção capitalista.

Para tanto, adotou-se uma abordagem qualitativa, de caráter exploratório e analítico, fundamentada em revisão bibliográfica e na articulação entre referenciais teóricos e dados secundários, visando compreender as relações entre mobilidade urbana, emissões de GEE e produção do espaço.

Material e Métodos

A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, de caráter exploratório e analítico, tendo como objetivo investigar as relações entre mobilidade urbana, emissões de gases de efeito estufa (GEE) e produção do espaço no contexto de Florianópolis.

Os procedimentos metodológicos fundamentaram-se em revisão bibliográfica e análise documental. A revisão bibliográfica contemplou autores do campo da Geografia, com ênfase na mobilidade enquanto prática social e elemento estruturante do espaço urbano, além de contribuições provenientes do planejamento urbano e ambiental.

A análise documental baseou-se em dados secundários provenientes de instituições oficiais, como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), utilizado para caracterização demográfica do município, e o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), empregado na análise das emissões de GEE em Florianópolis.

Por fim, os dados empíricos e os referenciais teóricos foram articulados por meio de uma abordagem interpretativa, buscando evidenciar as relações entre a predominância do modal rodoviário, a intensificação das emissões de GEE e a reprodução das desigualdades socioespaciais, a partir de uma leitura crítica da produção do espaço urbano.

Espaço Urbano, Mobilidade e Meio Ambiente

É indiscutível que no contexto das cidades contemporâneas, a mobilidade urbana é um elemento indispensável no cotidiano do ser humano, seja no deslocamento à pé até a padaria mais próxima de sua residência, seja no por meio do uso do automóvel, ônibus ou de outro modal até o trabalho. Vasconcellos (2012), destaca que a mobilidade urbana tende a ser vivenciada de forma cotidiana e naturalizada pelo ser humano, sem que haja, necessariamente, uma compreensão crítica acerca dos fatores estruturais que condicionam os deslocamentos e os problemas a eles associados.

Para compreender tal argumento, é necessário entender que as cidades são resultados das práticas sociais condicionadas pela estrutura urbana e pelas relações de poder que as atravessam — o sistema econômico, o valor da terra, o capital, o Estado, os processos migratórios etc — que condicionam cada lugar pela soma das influências e processos acumulados em seu passado e consequentemente resultantes daquelas com maior relação e poder no presente (Santos, 2006; Harvey, 2005). Dentro desta dinâmica, é fundamental reconhecer a cidade como um espaço de produção coletiva (Vasconcellos, 2012).

Essa compreensão amplia-se ao considerar a mobilidade como um elemento constitutivo de produção do espaço urbano. Sendo justamente o fruto dessa produção coletiva, em que a mobilidade é resultado e resultante das formas em que o sujeito consome o espaço das cidades. Vasconcellos (2012), argumenta que a mobilidade expressa as desigualdades no acesso à cidade, na medida em que diferentes grupos sociais possuem condições distintas de deslocamento, definindo quem pode usufruir plenamente dos equipamentos urbanos e quem permanece limitado em sua circulação.

Nessa perspectiva, cabe entender o espaço urbano a partir de sua dimensão mais ampla. Milton Santos (1994), considera que o espaço geográfico — sua totalidade para além do urbano — como um conjunto indissociável de sistemas de objetos e sistemas de ações, sendo a técnica um elemento central na sua organização. No entanto, é evidente aqui, que a técnica em si não deve ser compreendida como um fator autônomo ou neutro, uma vez que ela é influenciada pelas dinâmicas do capital, moldando o espaço geográfico através de objetos técnicos e ações, resultando no meio técnico-científico-informacional. Nesse sentido, Harvey (2005), articula que a produção do espaço está intrinsecamente vinculada aos processos de acumulação, que orientam o meio técnico-científico-informacional na organização das ações no território. Assim, tal entendimento expressa a racionalidade espacial que tende a reproduzir desigualdade, ao privilegiar determinados usos, fluxos e agentes em detrimento de outros.

> "[...] a atividade econômica e a herança social distribuem os homens desigualmente no espaço, fazendo com que certas noções consagradas, como a rede urbana ou do sistema de cidades, não tenham validade para a maioria das pessoas, pois o seu acesso efetivo aos bens e serviços distribuídos conforme a hierarquia urbana depende do seu lugar sócio-econômico e também do seu lugar geográfico" (SANTOS, 1987, pg. 1).

Fica claro que o espaço não é homogêneo e contínuo; ao contrário, apresenta-se de forma heterogênea e fragmentada, resultado de processos históricos desiguais de produção e apropriação do território. Nesse sentido, a fragmentação da forma urbana — entendida como a materialidade, dispersão dos usos e a descontinuidade do tecido urbano — exerce influência direta sobre a mobilidade, na medida em que amplia as distâncias entre moradia, trabalho e serviços, tornando os deslocamentos mais longos, complexos e dependentes de determinados modais. Essa configuração espacial tende a reforçar a centralidade do transporte individual motorizado, sobretudo em contextos onde o transporte coletivo não acompanha a expansão urbana de forma eficiente (Vasconcellos, 2012). Como consequência, intensifica-se não apenas a sobrecarga do sistema viário, mas também os impactos ambientais associados à mobilidade, especialmente no que se refere ao aumento das emissões de gases de efeito estufa, ao maior consumo energético e à pressão sobre os sistemas naturais.

Além disso, a fragmentação da forma urbana afeta de modo diferente os grupos sociais que compõem o espaço urbano. Enquanto parcelas da população com maior renda dispõem de maior capacidade de escolha modal e conseguem mitigar os efeitos da distância por meio do uso do automóvel, os grupos socialmente mais vulneráveis — localizados nas periferias urbanas e áreas ambientalmente sensíveis — tornam-se mais dependentes de sistemas de transporte coletivo muitas vezes insuficientes, enfrentando maiores tempos de deslocamento e menor acesso às oportunidades urbanas. Dessa forma, a mobilidade, condicionada pela forma urbana fragmentada, revela-se como um importante vetor de reprodução das desigualdades socioespaciais, ao mesmo tempo em que contribui para a intensificação dos impactos ambientais no espaço urbano (Vasconcellos, 2012).

Nesse contexto, os sistemas de transporte — especialmente a infraestrutura viária e o automóvel — configuram-se como componentes fundamentais do sistema técnico contemporâneo, orientando a forma urbana e condicionando as possibilidades de deslocamento. A predominância do transporte rodoviário individual, portanto, não deve ser entendida como um fenômeno meramente técnico ou funcional, mas como resultado de um processo histórico vinculado às racionalidades dominantes do modo de produção capitalista. Como destaca Harvey (2005), a produção do espaço urbano está intrinsecamente relacionada às

dinâmicas de acumulação de capital, o que implica a reprodução de desigualdades socioespaciais e a priorização de determinadas formas de uso e circulação. Nesse sentido, a centralidade do automóvel reflete não apenas uma escolha de mobilidade, mas uma lógica de organização espacial que privilegia determinados grupos sociais e formas de consumo do espaço. Tal centralidade, conforma uma condição de dependência estrutural: à medida que a expansão da malha viária, a dispersão dos usos urbanos e a priorização de investimentos em infraestrutura rodoviária se reforça, há a limitação à viabilidade de modais alternativos que se adeque à realidade geográfica de uma cidade, consolidando um padrão de mobilidade de difícil reversão, onde "[...] nada pode ficar parado, porque o movimento é essencial" (Vasconcelos, 2012, pg. 149).

Essa lógica articula-se diretamente à produção dos impactos ambientais no espaço urbano, que não devem ser compreendidas como externalidades, mas como a expressão constitutiva da própria forma urbana e de seus padrões de mobilidade. Newman & Kenworthy (1998), demonstram que cidades caracterizadas pela alta dependência do automóvel apresentam maiores níveis de consumo energético e emissões de GEE. Nesse sentido, a forma urbana fragmentada, ao ampliar as distâncias e dificultar a implementação de sistemas de transporte coletivo eficientes, reforça a dependência do transporte individual motorizado, intensificando os impactos ambientais. Assim, as emissões de GEE configuram-se como o resultado direto da organização espacial de uma cidade, ao privilegiar determinados modos de circulação, como será visto adiante para o caso de Florianópolis.

Com base nas discussões, propõe-se um esquema analítico que sintetize as relações entre mobilidade, produção do espaço e impactos ambientais.

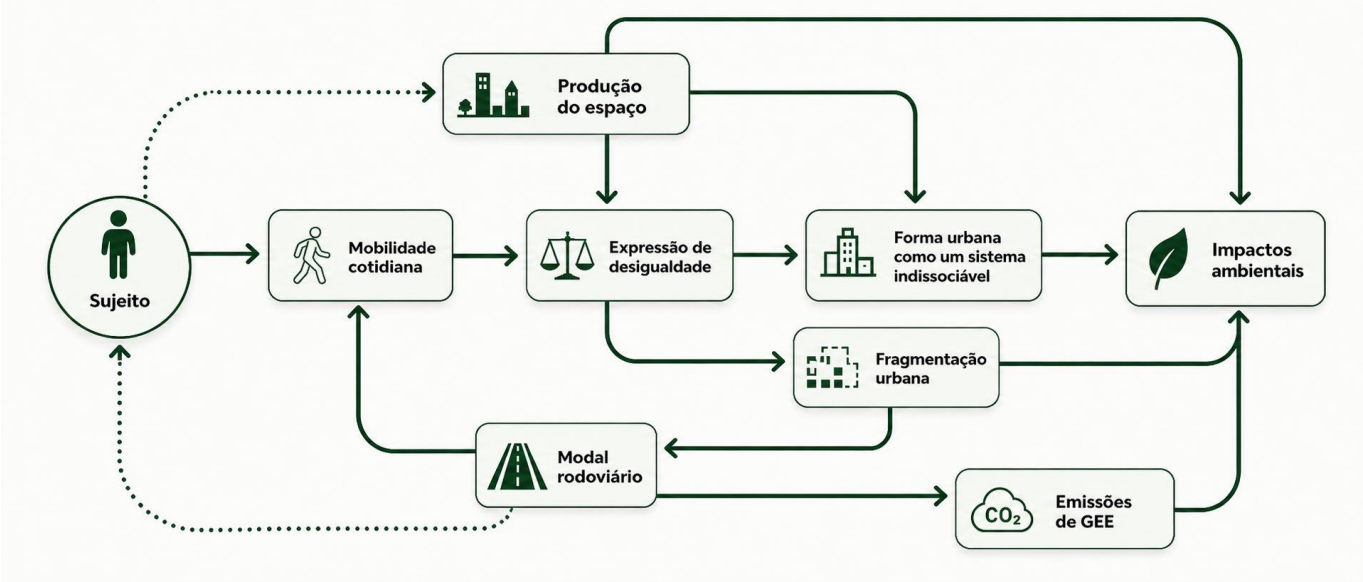


Figura 01: Esquema analítico das relações entre o espaço urbano, mobilidade e meio ambiente.
Fonte: elaborado pelo autor com base em Santos (1994), Vasconcellos (2012) e Harvey (2005).

No contexto do tema discutido, o esquema evidencia como a mobilidade cotidiana, longe de ser um fenômeno neutro ou meramente técnico, é condicionada pela forma urbana e pelas desigualdades socioespaciais, articulando-se à centralidade do transporte rodoviário e aos processos de fragmentação do tecido urbano. Nesse contexto, a intensificação das emissões de GEE não se configura apenas como um efeito colateral da circulação, mas como expressão de uma lógica de produção do espaço que reproduz simultaneamente desigualdades sociais e pressões ambientais. Vale destacar que, embora o esquema represente uma certa hierarquização dos fluxos, tais relações devem ser compreendidas como parte de uma totalidade dinâmica do espaço geográfico, na qual os diferentes elementos se articulam de forma indissociável, influenciando e sendo simultaneamente influenciados pelos demais.

Florianópolis: expressão de imobilidade urbana

A discussão apresentada possibilita compreender como as relações entre forma urbana, mobilidade e impactos ambientais se materializam no contexto de Florianópolis. Embora a análise aqui desenvolvida tenha como recorte o município, é indispensável considerar sua inserção no contexto metropolitano, marcado por intensas relações de dependência e integração funcional entre a capital e os municípios vizinhos. Dessa forma, a mobilidade em Florianópolis não pode ser compreendida de maneira isolada, uma vez que os fluxos cotidianos extrapolam os limites municipais e estruturam uma dinâmica metropolitana de deslocamentos.

O processo de metropolização, associado ao intenso crescimento demográfico de Florianópolis — de aproximadamente 27,5% em doze anos —, evidencia que "[...] a proeminência do capital imobiliário na região (sua capacidade de persuasão e dissuasão política) e os efeitos da renda da terra sobre a organização do espaço urbano são condicionantes danosas à mobilidade [...]" (Cocco, 2016, p. 267). Nesse contexto, a valorização fundiária e imobiliária contribuiu para a dispersão da ocupação urbana

e para a periferização da classe trabalhadora, especialmente em direção aos municípios continentais da Região Metropolitana de Florianópolis. Como consequência, intensificaram-se os deslocamentos pendulares diários entre Ilha e Continente, realizados majoritariamente pelo transporte individual ou por meio do transporte coletivo rodoviário, ampliando significativamente a sobrecarga do sistema viário.

Essas dinâmicas manifestam-se de forma particularmente evidente em Florianópolis em função de suas especificidades territoriais e do padrão de urbanização adotado. A condição insular, associada à dispersão e fragmentação da ocupação urbana, contribui para a ampliação das distâncias e para a dificuldade de implementação de sistemas de transporte coletivo eficientes, diversificados e integrados. Soma-se a isso uma estrutura viária limitada e concentrada em poucos eixos de conexão entre os extremos da ilha e o continente — notadamente as pontes, que funcionam como gargalos territoriais —, restringindo a fluidez dos deslocamentos e intensificando a vulnerabilidade do sistema de mobilidade aos congestionamentos (Cocco, 2016).

Nesse contexto, reforça-se a dependência do transporte motorizado individual, especialmente do automóvel e da motocicleta, elevando não apenas os custos sociais dos deslocamentos, mas também o consumo energético e os impactos ambientais associados à mobilidade urbana.

O processo histórico de ocupação e desenvolvimento de Florianópolis, especialmente a partir do início do século XX, reforça a perspectiva de "[...] uma cidade orientada para o sistema rodoviário" (De Paula, 2024, p. 67). A construção dos grandes aterros urbanos, da Ponte Hercílio Luz — e, posteriormente, das pontes Colombo Salles e Pedro Ivo —, a canalização de rios localizados na área central da cidade, como o Rio da Bulha, que deu lugar à Avenida Hercílio Luz, bem como a implantação de seis rodovias estaduais que interligam os diferentes setores da Ilha de Santa Catarina (SC-401, SC-402, SC-403, SC-404, SC-405 e SC-406), associadas ao expressivo crescimento populacional ao longo das décadas, transformaram uma cidade historicamente voltada para o mar em um espaço estruturado prioritariamente pelo transporte rodoviário, relegando sua essência litorânea e o potencial do modal aquaviário a um papel secundário (Culleton, 2019).

A ausência de um sistema de transporte marítimo consolidado é resultado de entraves históricos e técnicos, associados a conflitos de interesses políticos e econômicos, bem como à recorrente produção de estudos que apontam limitações para sua implantação. Entre esses exemplos, destaca-se sobretudo, um estudo apresentado pela Prefeitura de Florianópolis indicando elevados custos operacionais e baixa eficiência do modelo proposto (Igor, 2026). Tais fatores reforçam a persistente falta de integração modal e a manutenção da predominância do transporte rodoviário. Paralelamente, a principal alternativa existente — o transporte coletivo rodoviário — enfrenta inúmeras deficiências, como precarização da frota, baixa integração operacional, superlotação e tarifas entre as mais elevadas do país (CartaCapital, 2026). Cooco (2016), reforça tal debate:

> "Assim, a progressiva formação de uma metápole catarinense multipolar, que espraia funções ao longo das cidades de seu entorno imediato, com deslocamentos pendulares também multidirecionais, contradiz-se com a baixa oferta de transportes públicos e de infraestruturas que trariam de conferir mais conectividade à mesma.
> Ademais, observa-se que o transporte público é um produto muito especial, cuja produção e a forma na qual é consumido possui um caráter intensamente espacial, isto é, ele participa da produção do espaço — na provisão e acessibilidade desiguais ao espaço da cidade — mas ao mesmo tempo, sofre a interferência do ambiente construído e do espaço em processo de produção" (Cocco, 2016, pg. 172).

A consolidação de um modelo de mobilidade fortemente dependente do transporte rodoviário individual está diretamente associada não apenas à priorização histórica desse modal, mas também à ausência ou fragilidade de alternativas estruturantes, como sistemas de transporte coletivo de média e alta capacidade e à subutilização do potencial hidroviário proporcionado pela condição insular do município. Como consequência, intensificam-se os congestionamentos decorrentes do uso massivo de automóveis e motocicletas, ampliam-se os tempos de deslocamento e elevam-se significativamente as emissões de gases de efeito estufa. Nesse cenário, a mobilidade urbana deixa de ser apenas uma questão de infraestrutura e passa a expressar, de forma concreta, as contradições entre a organização do espaço urbano, as desigualdades no acesso à cidade e os limites ambientais impostos ao desenvolvimento urbano contemporâneo (Santos, 2006; Harvey, 2005; Vasconcellos, 2012).

Esse contexto evidencia que o modelo de mobilidade adotado em Florianópolis não apenas condiciona a forma de circulação no território, mas também possui impactos diretos sobre a intensificação das emissões de gases de efeito estufa. A elevada dependência do transporte motorizado individual, associada aos congestionamentos recorrentes e à baixa diversificação modal, contribui para o aumento do consumo de combustíveis fósseis e, consequentemente, para a ampliação das emissões associadas ao setor de transportes, inserindo a mobilidade urbana como elemento central na discussão das mudanças climáticas em escala local.

Implicações ambientais da produção do espaço

Como já discutido, a mobilidade expressa desigualdades no acesso à cidade (Vasconcellos, 2012), uma vez que não se resume apenas ao deslocamento em si, mas à forma como este condiciona o acesso aos espaços, serviços e oportunidades urbanas, podendo, portanto, constituir-se como um fator de exclusão socioespacial. Ao mesmo tempo, a predominância do sistema modal rodoviário individual produz impactos diretos tanto nas emissões de gases de efeito estufa quanto nas condições de vida urbana. Nesse contexto, explicita-se uma contradição central: os grupos sociais que mais contribuem para as emissões, frequentemente

associados ao uso intensivo do transporte individual motorizado não são, em geral, aqueles mais vulneráveis aos seus impactos, evidenciando desigualdades no acesso à cidade e na forma em que as mudanças climáticas afetam a sociedade.

Segundo os dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) para o ano de 2024, o setor de Energia foi responsável por 73,1% do total das emissões de GEE no município, somando 614,38 ktCO₂e. Dentro desse setor, a categoria de transportes destacou-se como a principal fonte emissora, concentrando 571,86 ktCO₂e, o equivalente a 93,1% das emissões do setor energético. A Figura 2 evidencia a evolução das emissões de GEE entre 2010 e 2024, demonstrando a predominância do setor de Energia — na cor salmão — ao longo da série histórica.

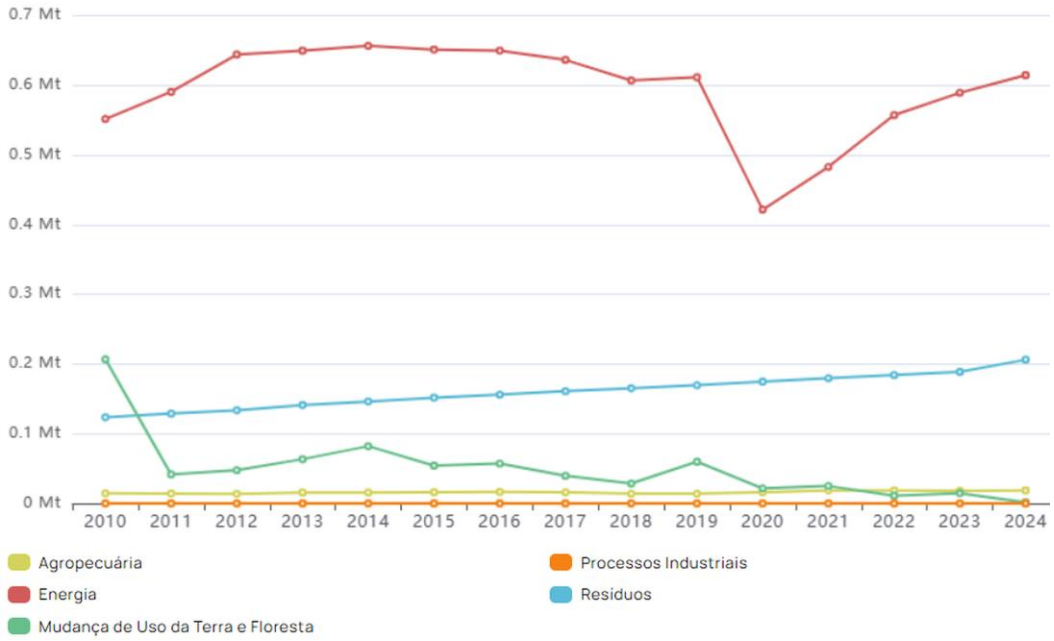


Figura 02: Emissões de GEE no município de Florianópolis entre os anos de 2010 a 2024. Fonte: SEEG, 2026.

A análise da série histórica das emissões de gases de efeito estufa em Florianópolis (2010–2024) evidencia a predominância do setor de energia como principal responsável pelas emissões ao longo de todo o período, com uma queda pontual no ano de 2020 (421.471 t CO_2 equivalente) , associada aos efeitos da pandemia de COVID-19. Paralelamente, observa-se o crescimento contínuo das emissões provenientes do setor de resíduos, indicando pressões diretamente relacionadas ao aumento populacional e à intensificação do processo de urbanização. Em contraste, os setores de mudança de uso da terra e floresta, agropecuária e processos industriais apresentam participação relativamente reduzida, o que reforça a compreensão de que a dinâmica das emissões no município não está centrada na expansão territorial expressiva ou na atividade industrial, mas sim na forma de organização do espaço urbano e, sobretudo, na estrutura da mobilidade, marcada pela predominância do transporte motorizado individual. Ao mesmo tempo, observa-se que, embora as emissões associadas ao setor de energia apresentem crescimento contínuo após 2020 — passando de 482.824 t CO_2e em 2021 para 557.131 t CO_2e em 2022, 589.152 t CO_2e em 2023 e 614.375 t CO_2e em 2024 —, os valores ainda não superam os patamares registrados em anos anteriores, como no período entre 2012 e 2015, quando foram registrados 644.009 t CO_2e, 649.652 t CO_2e, 656.515 t CO_2e e 651.190 t CO_2e, respectivamente.

Tais dados evidenciam que as emissões de GEE em Florianópolis, em especial do setor de energia, confirmam que a centralidade da mobilidade urbana do transporte rodoviário individual é o principal emissor. Assim, o comportamento da série histórica valida o argumento de que a forma de organização do espaço urbano e a estrutura da mobilidade constituem elementos determinantes na intensificação das emissões, mais do que outros fatores associados.

Ao aprofundar a análise dos dados do setor de Energia, evidencia-se de forma ainda mais clara essa centralidade na dinâmica das emissões de gases de efeito estufa, consolidando-se como a principal fonte emissora do setor. O gráfico de Sankey apresentado na Figura 3 ilustra essa configuração, evidenciando a predominância das emissões associadas ao transporte rodoviário na estrutura emissora do município.

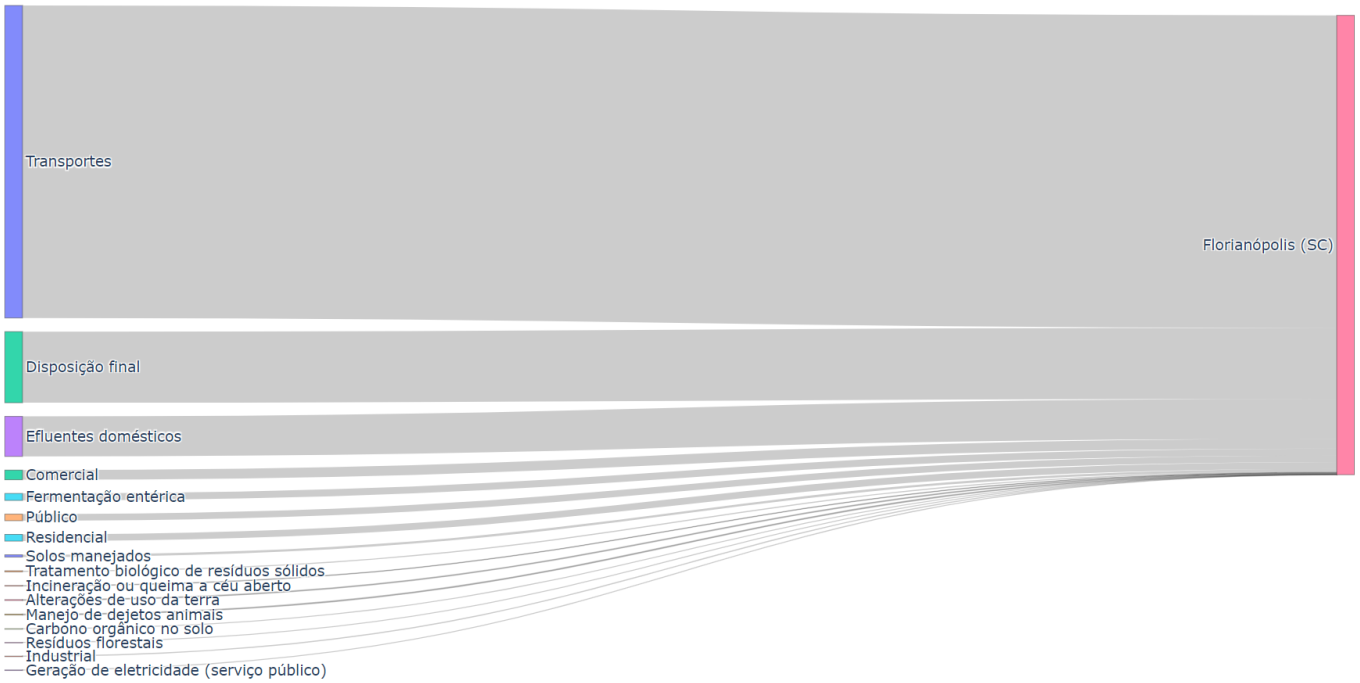


Figura 03: Emissões de GEE do Setor de Energia, no município de Florianópolis em 2024.
Fonte: elaborado pelo autor com base em SEEG (2026) com apoio de inteligência artificial.

Cabe destacar que as emissões de gases de efeito estufa provenientes do setor de transportes possuem papel central na intensificação das mudanças climáticas contemporâneas, especialmente em contextos urbanos marcados pela elevada dependência de combustíveis fósseis (Da Silva *et.al,* 2025). Com base nas discussões acerca do tema, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) destaca que o setor de transportes responde por parcela significativa das emissões globais de CO_2 relacionadas à energia, apresentando crescimento contínuo nas últimas décadas em função da expansão da urbanização dispersa e da dependência do transporte motorizado individual (IPCC, 2022). Além disso, o IPCC aponta que a forma urbana e a organização espacial das cidades influenciam diretamente os padrões de mobilidade e, consequentemente, os níveis de emissão de GEE, uma vez que cidades fragmentadas e orientadas ao automóvel tendem a demandar maiores distâncias de deslocamento e maior consumo energético (IPCC, 2022).

Nesse sentido, as emissões associadas à mobilidade urbana não devem ser compreendidas apenas como um problema ambiental isolado, mas como manifestação das formas de produção e apropriação do espaço urbano. A predominância histórica do modal rodoviário, associada à fragmentação territorial, aos deslocamentos pendulares metropolitanos e à baixa diversificação modal, consolida a mobilidade como uma condicionante central tanto da intensificação das emissões de GEE quanto das desigualdades socioespaciais produzidas no território.

A elevada participação do setor de Energia nas emissões totais especialmente vinculada ao transporte rodoviário, evidencia uma dependência estrutural do automóvel, que ultrapassa a dimensão individual da escolha modal. A dispersão da ocupação urbana, os deslocamentos pendulares metropolitanos e a concentração dos principais eixos de circulação em poucas conexões territoriais produzem uma dinâmica de mobilidade intensiva em combustíveis fósseis, marcada por congestionamentos recorrentes e longos tempos de deslocamento (Cocco, 2016).

Dessa forma, os dados apresentados evidenciam que as emissões de GEE em Florianópolis não podem ser compreendidas apenas como resultado do aumento da circulação de veículos, mas como expressão de uma racionalidade espacial historicamente consolidada no município. A predominância das emissões associadas ao setor de transportes revela que a produção do espaço urbano esteve diretamente vinculada à expansão de uma lógica rodoviarista, responsável por estruturar os fluxos cotidianos, orientar os investimentos em infraestrutura e condicionar as possibilidades de deslocamento da população.

Mais do que um problema estritamente ambiental, os dados revelam as contradições de um modelo urbano que produz simultaneamente imobilidade e emissão. Enquanto a expansão urbana fragmentada amplia as necessidades de deslocamento, a ausência de alternativas modais eficientes reforça a centralidade do transporte individual motorizado, consolidando um ciclo de dependência rodoviária de difícil reversão. Nesse contexto, as emissões de GEE configuram-se como manifestação concreta das formas desiguais de produção e apropriação do espaço urbano, evidenciando, de maneira prática, a discussão teórica anteriormente apresentada.

Considerações Finais

Considerando a análise desenvolvida ao longo deste artigo, evidencia-se que a intensificação das emissões de gases de efeito estufa em Florianópolis não pode ser compreendida como um fenômeno dissociado da forma de produção do espaço urbano. Mais do que um efeito colateral da circulação cotidiana, tais emissões expressam uma racionalidade territorial

historicamente consolidada, na qual a expansão urbana, a organização dos fluxos e a priorização de investimentos em infraestrutura estiveram fortemente orientadas pelo modal rodoviário. Nesse sentido, a predominância do transporte rodoviário individual, associada à fragmentação da forma urbana, à dispersão da ocupação e à insuficiência de alternativas modais integradas, contribui diretamente para a intensificação das emissões de GEE e para a reprodução das desigualdades socioespaciais no município.

Os resultados empíricos reforçam essa interpretação ao evidenciar a centralidade do setor de energia na estrutura emissora de Florianópolis e, sobretudo, o peso decisivo da categoria transportes em sua composição. Esse dado não apenas confirma a relevância da mobilidade urbana na discussão ambiental contemporânea, como também revela que a problemática climática local está profundamente enraizada na forma como a cidade foi historicamente organizada e nos padrões de deslocamento que essa organização passou a exigir. Assim, a emissão de GEE deixa de ser entendida apenas como um indicador ambiental e passa a ser interpretada como manifestação concreta de um modelo urbano intensivo em combustíveis fósseis, dependente do automóvel e incapaz de oferecer, em escala adequada, alternativas de deslocamento mais eficientes, integradas e menos emissoras.

No caso de Florianópolis, essa questão assume contornos ainda mais expressivos em razão de suas especificidades territoriais. A condição insular, a concentração dos principais eixos de circulação em poucas conexões estruturais, os deslocamentos pendulares metropolitanos e a baixa diversificação modal produzem um quadro de elevada vulnerabilidade da mobilidade urbana, marcado por congestionamentos recorrentes, longos tempos de deslocamento e forte dependência do transporte motorizado individual. A cidade, que historicamente poderia ter estruturado parte significativa de sua circulação a partir de sua relação com o mar e de alternativas mais integradas entre ilha e continente, consolidou-se prioritariamente sob uma lógica rodoviarista. Como consequência, o automóvel deixou de representar apenas um meio de transporte e passou a constituir um elemento organizador da própria dinâmica urbana, condicionando a localização das atividades, a acessibilidade ao território e a forma como diferentes grupos sociais vivenciam a cidade.

Nessa perspectiva, a problemática ambiental discutida neste trabalho não se restringe ao aumento das emissões em si, mas remete às contradições de um modelo de urbanização que produz simultaneamente circulação seletiva, imobilidade cotidiana e degradação ambiental. Enquanto determinados grupos sociais dispõem de maior capacidade de apropriação do espaço urbano por meio do uso intensivo do transporte individual motorizado, outros permanecem submetidos a condições mais precárias de deslocamento, maiores tempos de viagem e menor acesso às oportunidades urbanas. Desse modo, a mobilidade revela-se não apenas como questão técnica ou funcional, mas como dimensão estruturante das desigualdades urbanas e das distintas possibilidades de acesso à cidade. As emissões associadas ao transporte, portanto, devem ser entendidas também como expressão das formas desiguais de produção, uso e apropriação do espaço urbano.

Diante disso, conclui-se que enfrentar a intensificação das emissões de gases de efeito estufa em Florianópolis exige ir além de soluções pontuais voltadas exclusivamente à fluidez do tráfego ou à ampliação da capacidade viária. A superação da dependência rodoviária pressupõe uma revisão mais profunda do próprio modelo de urbanização que estruturou a cidade, o que implica fortalecer alternativas modais de caráter coletivo e integrado, recuperar o debate sobre o potencial do transporte aquaviário, ampliar as condições de caminhabilidade e ciclabilidade e, sobretudo, articular mobilidade e planejamento urbano a partir de uma perspectiva territorial mais ampla. Em outras palavras, reduzir emissões no município não depende apenas da substituição de tecnologias ou da melhoria operacional dos deslocamentos, mas da capacidade de reorientar a produção do espaço urbano em direção a formas menos dispersas, menos desiguais e menos dependentes do automóvel.

Referências Bibliográficas

CARTACAPITAL. Por que Florianópolis tem a tarifa de ônibus mais cara do país? **BRCidades**, São Paulo, 17 mar. 2026. Disponível em: <https://www.cartacapital.com.br/blogs/br-cidades/por-que-florianopolis-tem-a-tarifa-de-onibus-mais-cara-do-pais/>. Acesso em: 20 abr. 2026.

COCCO, Rodrigo Giraldi. **Transporte público e mobilidade urbana: contradições entre políticas públicas e demandas por mobilidade na Região Metropolitana de Florianópolis-SC**. Universitat Autònoma de Barcelona, 2016.

CULLETON, Billy. Um século da Avenida Hercílio Luz em imagens – Do Rio da Bulha à canalização e cobertura total. **Floripa Centro**, Florianópolis, 11 jul. 2019. Disponível em: <https://floripacentro.com.br/um-seculo-da-avenida-hercilio-luz-em-imagens-do-rio-da-bulha-a-canalizacao-e-cobertura-total/>. Acesso em: 15 abr. 2026.

DA SILVA, Anderson Jefferson Gomes et al. As emissões de Gases de Efeito Estufa advindos dos transportes rodoviários no Estado de Alagoas. **Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 5, p. e15144-e15144, 2025. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/15144>. Acesso em: 20 abr. 2026.

DE PAULA, Joana Coutinho Werneck. **Possibilidades e limitações do transporte marítimo de passageiros na área conurbada de Florianópolis-SC**. Florianópolis, SC, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/254153>. Acesso em: 15 abr. 2026

IBGE. Florianópolis (SC): panorama. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/florianopolis/panorama>. Acesso em: 12 abr. 2026.

IBGE. Florianópolis (SC): sinopse Censo 2010. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/florianopolis/pesquisa/23/27652?detalhes=true>. Acesso em: 12 abr. 2026.

IGOR, Renato. Transporte marítimo é inviável em Florianópolis, diz prefeitura. **NSC Total**, Florianópolis, 4 fev. 2026. Disponível em: <https://www.nsctotal.com.br/colunistas/renato-igor/transporte-maritimo-e-inviavel-em-florianopolis-diz-prefeitura>. Acesso em: 15 abr. 2026.

IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. **Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. SHUKLA, P. R. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: 24 abr. 2026.

LEMOS, André. Cultura da mobilidade. **Revista FAMECOS: mídia, cultura e tecnologia**, n. 40, p. 28-35, 2009. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/4955/495550196004.pdf>> Acesso em: 12 abr. 2026.

HARVEY, David. **A Produção Capitalista do Espaço**. Annablume, 2005.

NEWMAN, Peter; KENWORTHY, Jeffrey. **Sustainability and cities:** overcoming automobile dependence. 1998.

SANTOS, Milton. **A natureza do espaço:** técnica e tempo, razão e emoção. Edusp, 2002.

SANTOS, Milton. **O espaço do cidadão**. São Paulo, Studio Nobel, 1987.

SANTOS, Milton. **Técnica, espaço, tempo:** globalização e meio técnico-científico informacional. São Paulo, Hucitec, 1994.

VASCONCELLOS, Eduardo Alcântara de. **Mobilidade urbana e cidadania**. Senac Editoras, 2012.

A ELETRIFICAÇÃO DA FROTA VEICULAR E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS

1 Bruno Barbosa Manhães e Rangel Lima, 2 Luiz Fernando Rosa Mendes
1 Instituto Federal Fluminense (IFF), e-mail: l.bruno@gsuite.iff.edu.br; 2 Instituto Federal Fluminense (IFF), e-mail: llfmendes@iff.edu.br

Palavras-chave: Veículos elétricos; Impactos ambientais; Matriz elétrica.

Resumo

A eletrificação da frota veicular é considerada uma alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor de transportes. No entanto, seus benefícios ambientais dependem do contexto energético e devem ser avaliados ao longo de todo o ciclo de vida dos veículos. Este estudo teve como objetivo analisar os impactos ambientais associados à substituição de veículos com motores de combustão interna por veículos híbridos e elétricos. A pesquisa consistiu em uma revisão sistemática da literatura, de caráter descritivo e qualitativo, seguindo as diretrizes do método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses* (PRISMA) 2009. Foram realizadas buscas nas bases *Scopus* e *Web of Science* para artigos publicados entre 2019 e 2025, resultando em 14 estudos selecionados. Os resultados indicam que veículos elétricos podem reduzir significativamente as emissões de GEE, especialmente em regiões com matriz elétrica renovável. Contudo, impactos relevantes concentram-se na fase de fabricação, particularmente na produção de baterias. No Brasil, devido à matriz elétrica predominantemente renovável, a eletrificação da frota apresenta maior potencial de impactos ambientais favoráveis.

Introdução

A eletrificação da frota veicular é uma alternativa promissora para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor de transportes, mas seus benefícios ambientais dependem do contexto energético regional. Estudos de ciclo de vida indicam que, em países cuja matriz elétrica é baseada em combustíveis fósseis, veículos elétricos podem emitir tanto quanto ou mais que veículos híbridos (ALWOSHEEL; KORONA, 2025; PRABHU; MUKHOPADHYAY, 2024). Por isso, a sustentabilidade da mobilidade elétrica deve ser avaliada considerando todo o ciclo de vida dos veículos, incluindo produção, uso e a matriz elétrica, ressaltando a necessidade de análises específicas para cada realidade energética.

A 26ª Conferência das Partes (COP26) representou um marco relevante no avanço das estratégias globais de descarbonização, com destaque para o setor de transportes, historicamente responsável por uma parcela significativa das emissões de gases de efeito estufa. Realizada em Glasgow, a conferência consolidou o papel da mobilidade sustentável como elemento central nas políticas climáticas internacionais, ao promover iniciativas voltadas à redução das emissões no transporte rodoviário. Nesse contexto, destaca-se o lançamento da Declaração de Glasgow sobre Veículos de Emissão Zero, por meio da qual diversos países, montadoras e instituições assumiram o compromisso de acelerar a transição para veículos de emissão zero, com metas indicativas de eliminação gradual dos veículos movidos a combustão interna entre 2035 e 2040. Embora de caráter não vinculante, essa declaração sinaliza uma convergência internacional em torno da eletrificação da frota veicular, reforçando a importância de políticas públicas, inovação tecnológica e investimentos em infraestrutura como pilares fundamentais para a transformação do setor de transportes (ONU, 2026).

Atualmente, o setor automotivo conta com diferentes categorias de veículos, definidas principalmente pelo tipo de motorização e tecnologia empregada. Os carros com motor a combustão interna utilizam combustíveis fósseis, como gasolina e diesel, sendo ainda predominantes no mercado global. Já os veículos híbridos combinam um motor a combustão com um ou mais motores elétricos, permitindo maior eficiência energética e redução de emissões. Entre os híbridos, destacam-se tecnologias como híbridos convencionais, plug-in e híbridos leves *(mild hybrid*). Por sua vez, os veículos 100% elétricos são movidos exclusivamente por baterias recarregáveis, eliminando emissões diretas de poluentes. Além dessas categorias principais, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas, como células a combustível de hidrogênio e sistemas avançados de regeneração de energia. Esse conjunto de inovações reflete a transição global rumo a uma mobilidade mais sustentável e eficiente.

Além disso, a substituição da matriz energética da frota veicular apresenta significativo potencial para a redução dos impactos ambientais associados ao setor de transportes, especialmente no contexto das mudanças climáticas. De acordo com o relatório síntese AR6 – *Sixth Assessment Report* (Relatório Síntese) do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) Publicado em 2023, o setor de transportes é responsável por aproximadamente 15% das emissões globais de GEE e por cerca de 23% das emissões de dióxido de carbono (CO_2) relacionadas ao setor energético em escala mundial. Nesse sentido, a transição para fontes de energia limpa, aliada à renovação da matriz energética, configura-se como uma estratégia central de mitigação, contribuindo não apenas para a redução das emissões, mas também para o aumento da eficiência energética do sistema de transportes (UNFCCC, 2026).

Outro fator que corrobora essa análise é que, segundo a Ministério de Minas e Energia (MME) os combustíveis fósseis figuram entre os principais responsáveis pelas emissões de GEE no país (MME, 2026). Embora a matriz elétrica brasileira seja predominantemente renovável, ainda há significativa dependência de fontes fósseis, especialmente no setor de transportes, responsável pela movimentação de insumos e maquinários em escala nacional. Nesse contexto, a transição energética busca reduzir a dependência da cadeia logística rodoviária baseada em combustão, promovendo alternativas tecnológicas, como veículos híbridos e totalmente elétricos, com vistas à descarbonização progressiva e ao aumento da eficiência energética (EPE, 2026).

A substituição de veículos com motores de combustão interna (*Internal Combustion Engine Vehicles* – ICEVs) por veículos elétricos é impulsionada pela busca por maior eficiência energética e redução das emissões diretas, uma vez que motores elétricos apresentam eficiência superior a 90% e menor complexidade mecânica. No entanto, os principais impactos ambientais dos veículos elétricos concentram-se na fase de fabricação, especialmente na produção de baterias de íon-lítio, que demandam elevados recursos energéticos e minerais. (PARADISI *et al*, 2025; WOHLSCHLAGER *et al*., 2024). Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar os aspectos ambientais associados à transição para veículos elétricos, contribuindo para uma análise mais abrangente sobre sua viabilidade ambiental.

Materiais

O escopo do trabalho proposto concentra-se na comparação entre sistemas de combustão interna e frotas veiculares híbridas ou totalmente elétricas, com o objetivo de avaliar a transição da matriz energética da frota veicular atual nas grandes cidades.

Métodos

Esta pesquisa é uma revisão sistemática descritiva e exploratória com abordagem qualitativa, seguindo as diretrizes do método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses* (PRISMA) 2009, que inclui um *checklist* e executada em quatro etapas: identificação, seleção, elegibilidade e incluso (GIL, 2002; MOHER *et al*., 2009).
A etapa inicial desta revisão consistiu na busca por estudos científicos nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science (*WoS). Para o gerenciamento das referências e a remoção de duplicatas, utilizou-se a ferramenta Zotero 8.

Na sequência, foram aplicados filtros que buscaram artigos publicados em periódicos no período de 2019 a 2025. Posteriormente, realizou-se a triagem com base na leitura dos títulos e resumos, seguida da análise detalhada dos estudos selecionados, considerando a questão-problema estabelecida, a saber: “A eletrificação da frota veicular representa uma solução ambientalmente sustentável quando analisada sob a perspectiva do ciclo de vida e da matriz elétrica?”.

Resultados e Discussões

Utilizado no método proposto, a revisão inicial consistiu na busca por artigos científicos nas bases *Scopus*, realizada em 14 de janeiro de 2026, utilizando as *strings* de busca definidas ((“eletrificação da frota" OR "veículos elétricos") AND ("motor de combustão interna" OR "ciclo Otto") AND ("avaliação do ciclo de vida") AND ("baterias de íon-lítio") AND ("matriz elétrica") AND ("impactos ambientais")), que resultaram em 103 registros. As referências foram exportadas em formato RIS e importadas para o Zotero 8, onde foi realizado o processo de remoção de duplicatas por meio de critérios automáticos e verificação manual, resultando em 80 artigos únicos.

Em seguida, aplicaram-se filtros por tipo de documento e período de publicação do periódico (2019–2025), e, após a leitura dos títulos e resumos, 44 estudos foram selecionados para análise em texto completo. Destes, 29 foram excluídos por não atenderem aos critérios de elegibilidade, como inconsistência metodológica, desalinhamento com a questão-problema ou indisponibilidade de acesso, resultando em uma amostra final composta por 15 estudos incluídos, como pode ser visto na Figura 1.

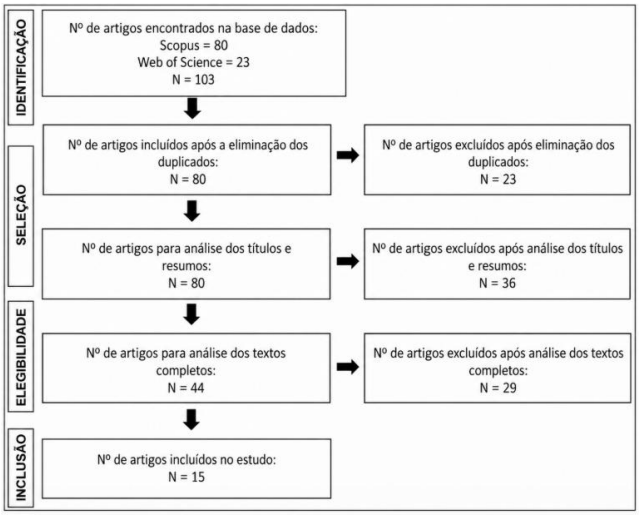


Figura 01: Fluxograma da seleção dos artigos
Fonte: Adaptado de Moher *et al.* (2009).

A busca realizada na base de dados *Scopus* identificou 80 artigos, enquanto na *WoS* foram encontrados 23 documentos. Do total de 103 registros, 23 estavam duplicados entre as bases, resultando em 80 artigos distintos. Desses, verificou-se que 15 se enquadram na temática desta pesquisa. A análise concentrou-se em identificar se a eletrificação da frota veicular representa uma solução ambientalmente sustentável quando analisada sob a perspectiva do ciclo de vida e da matriz elétrica. O quadro 1 apresenta os artigos selecionados, organizados por título, periódico, autor e ano de publicação

Título	Periódico	Autor(es)/ ano
Analysis of the impact on GHG emissions from the adoption of electric vehicles in the vehicle fleet of the state of São Paulo, Brazil: Systematic review and ridge regression analysis	*Energy Strategy Reviews*	Grandinetti *et al.* (2025)
A techno-economic life cycle assessment of H_2 fuelled and electrified urban buses	*Applied Energy*	Paradisi *et al.* (2025)
Comparative analysis of total cost of ownership and well-to-wheel emissions for electric freight vehicles: A case study for South Korea	*Energy Conversion and Management: X*	Lee e Park (2025)
Study on Carbon Emissions from Road Traffic in Ningbo City Based on LEAP Modelling	*Sustainability*	Lu, Guo e Xiao (2025)
Context matters: Life cycle emissions and policy implications of electric vehicles in evolving carbon-intensive energy systems	*Energy*	Alwosheel e Koroma (2025)
Research on Electric Vehicle Mobility: A Bibliometric Review and Research Agenda	*ScienceDirect*	Varghese *et al.* (2025)
Assessing the environmental benefits of passenger cars electrification in metropolises: a case study of Singapore	*International Journal of Sustainable Transportation*	Yan *et al.* (2024)
Environmental effects of vehicle-to-grid charging in future energy systems – A prospective life cycle assessment	*Applied Energy*	Wohlschlager *et al.* (2024)
The economic and environmental consequences of the electric vehicle transition in India	*Energy for Sustainable Development*	Prabhu e Mukhopadhyay (2024)
Carbon footprint comparison analysis of passenger car segment electric and ICE propelled vehicles in Kuwait	*Alexandria Engineering Journal*	Doust e Otkur (2023)
Life cycle assessment of shared and private use of automated and electric vehicles on interurban mobility	*Applied Energy*	Vilaça *et al.* (2023)
Potential for reducing CO_2 emissions from passenger cars in Japan by 2030 to achieve carbon neutrality	*IATSS Research*	Rinawati *et al.* (2023)
Life Cycle Assessment (LCA) of BEV's environmental benefits for meeting the challenge of ICExit (Internal Combustion Engine Exit)	*Energy Reports*	Zheng e Peng (2021)
Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios	*Applied Energy*	Cox *et al.* (2020)
Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity	*Resources, Conservation & Recycling*	Watari *et al.* (2019)

Quadro 01: Artigos selecionados.

A análise de ciclo de vida (*Life Cycle Assessment* – LCA) no estudo de Cox *et al.* (2020) projeta que, até 2040, os veículos elétricos a bateria (*Battery Electric Vehicles* – BEVs) consolidarão sua superioridade ambiental, com reduções nas emissões de GEE entre 25% e 70% em comparação aos veículos híbridos, resultado associado à descarbonização progressiva da matriz elétrica europeia e aos avanços na eficiência da produção de baterias. Esse desempenho amplia as vantagens dos BEVs em relação às tecnologias baseadas em combustão interna e combustíveis sintéticos. Do ponto de vista econômico, destaca-se que esses veículos tendem a apresentar custo total de propriedade (TCO) inferior aos modelos de ICEVs e veículos elétricos híbridos (*Hybrid Electric Vehicles* – HEV), impulsionado por economias de escala e menores custos operacionais ao longo do ciclo de vida. Além disso, o potencial de mitigação climática dos BEVs mostra-se robusto em diferentes cenários de políticas energéticas, mantendo-se como a alternativa tecnológica de maior impacto positivo independentemente do rigor das metas de emissão. Entretanto, a transição em escala global exige atenção a desafios estruturais, como o desenvolvimento de cadeias eficientes de reciclagem de baterias e a garantia de fornecimento sustentável e ético de matérias-primas críticas. Nesse contexto, os resultados reforçam que a eletrificação da mobilidade constitui uma estratégia central para alinhar metas climáticas ambiciosas à viabilidade econômica, posicionando os BEVs como um dos principais pilares da mobilidade sustentável futura.

A análise de ciclo de vida (ACV) segundo o estudo temporal de Alwosheel e Korona (2025) revela que a eletrificação não garante sustentabilidade imediata em matrizes intensivas em carbono, onde veículos elétricos a bateria (BEVs) podem emitir até 15% mais gases de efeito estufa que modelos híbridos (HEVs). Os dados demonstram que a variabilidade nas emissões chega a 45% dependendo do horário de carregamento e da estação do ano, evidenciando a dependência direta da matriz elétrica.

Portanto, a redução real de impacto ambiental no ciclo de vida exige uma descarbonização agressiva da rede. Sem essa transição energética paralela, a adoção de VEs apenas desloca as emissões do escapamento para as usinas termelétricas, comprometendo os objetivos climáticos locais.

Os estudos desenvueltos por Lu, Guo e Xiao (2025) convergem ao indicar que a eletrificação da frota veicular apresenta elevado potencial de diminuição das emissões de GEE, embora os benefícios ambientais estejam fortemente condicionados à matriz elétrica e ao contexto de uso. O trabalho de Lu, Guo e Xiao (2025) avaliou mais de 30.000 veículos na cidade de Singapura por meio de LCA e demonstra que a substituição de ICEVs por veículos elétricos podem reduzir as emissões totais de GEE em até 45% até 2040. Contudo, o estudo evidencia que a transição para fontes energéticas mais limpas podem acrescentar uma redução adicional de até 26%, reforçando o papel central do *mix* elétrico e da infraestrutura de recarga na ampliação dos ganhos ambientais da mobilidade elétrica em grandes centros urbanos.

Resultados similares são analisados no contexto brasileiro a partir do estudo de Grandinetti *et al.* (2025), que avaliou diferentes cenários na introdução de veículos elétricos no estado de São Paulo. A pesquisa indicou que, mesmo considerando as emissões indiretas associadas à geração de eletricidade, a adoção progressiva de veículos elétricos pode resultar em reduções significativas de GEE, especialmente em cenários de maior utilização desses veículos na frota. A projeção de uma entrada de 75% de veículos elétricos aponta para uma diminuição considerável das emissões totais do setor de transportes, demonstrando o potencial da eletrificação como instrumento efetivo para o cumprimento de metas climáticas regionais, particularmente em regiões com matriz elétrica relativamente limpa, como o Brasil.

Por sua vez, os trabalhos de Doust, Otkur (2023) e Rinawati *et al.* (2023) contribuem para a discussão ao demonstrar que, mesmo em contextos caracterizados por matrizes elétricas dependentes de combustíveis fósseis, os veículos elétricos ainda apresentam vantagens ambientais. A comparação entre um veículo a combustão interna e um veículo elétrico a bateria revelou uma redução aproximada de 52,2% nas emissões de CO_2 por ciclo de condução, mesmo considerando um cenário energético desfavorável. Além disso, os autores evidenciam que o perfil do ciclo de condução influencia significativamente os resultados, com ciclos mais agressivos elevando as emissões absolutas, ainda que os veículos elétricos mantenham desempenho ambiental superior em todos os cenários estudados.

A mudança para tecnologias com baixo carbono, em especial os automóveis elétricos, é vista como uma abordagem essencial para diminuir as emissões de GEE como apontado por Varghese *et al.* (2025) e Watari *et al.* (2019). Contudo, essas inovações demandam uma quantidade elevada de materiais, dependendo fortemente de minerais como cobre, lítio, níquel, prata e cobalto. O crescimento do uso de veículos elétricos e de sistemas de energia solar tende a intensificar de maneira significativa os fluxos mundiais de materiais oriundos da mineração. Embora auxiliem na diminuição do consumo de combustíveis fósseis durante sua operação, a fabricação dessas tecnologias envolve processos industriais que consomem muita energia. Pesquisas também apontam potenciais benefícios a longo prazo, como a criação de empregos e a diminuição de despesas relacionadas à poluição e à saúde pública. A literatura enfatiza que o estudo dos veículos elétricos é abrangente, envolvendo questões energéticas, econômicas e ambientais. Nesse contexto, a transição energética exige um planejamento integrado nas áreas de energia, mineração e indústria. Portanto, garantir a viabilidade sustentável desse tipo de tecnologia requer uma abordagem sistêmica que considere de forma simultânea os recursos naturais, a economia e o meio ambiente.

Dessa forma, os resultados discutidos nos estudos de Zheng e Peng (2021), Vilaça *et al*. (2023) e Cox *et al.* (2020) indicam que a eletrificação da frota veicular pode ser considerada uma solução ambientalmente sustentável, desde que avaliada sob uma perspectiva de ciclo de vida. Os benefícios ambientais são variados em contextos com matrizes elétricas de baixa intensidade de carbono e com políticas voltadas à expansão de fontes renováveis, à melhoria da infraestrutura de recarga e à gestão adequada do ciclo de vida das baterias. Assim, os estudos reforçam que a sustentabilidade da mobilidade elétrica não depende exclusivamente da tecnologia veicular, mas da comunicação entre os setores de transporte, energia e planejamento ambiental. Dessa forma, no contexto brasileiro, cuja a matriz elétrica em sua maioria é predominantemente renovável, conclui-se que teria um impacto ambiental positivo se comparado com outros países do mundo ainda dependentes de matrizes energéticas movidas a combustíveis fósseis e seus componentes.

O artigo de Lee e Park (2025) analisa comparativamente o desempenho econômico e ambiental de veículos de carga leves movidos a diferentes fontes energéticas, com base nas metodologias de custo total de propriedade (TCO) e emissões no ciclo completo (*Well-to-Wheel*). Os resultados indicam que veículos movidos a diesel ainda apresentam menor custo inicial e maior competitividade em cenários tradicionais de uso. No entanto, os veículos elétricos demonstram vantagens significativas no longo prazo, diminuindo em até 30% a emissão de CO_2 e aproximadamente 90% de NO_X, especialmente em contextos de alta utilização e com incentivos governamentais. Do ponto de vista ambiental, a eletrificação se destaca pela expressiva redução de emissões de poluentes locais e GEE. Contudo, o estudo ressalta que os benefícios ambientais dos veículos elétricos dependem diretamente da matriz energética utilizada na geração de eletricidade. Dessa forma, evidencia-se que a transição para tecnologias mais limpas requer não apenas inovação tecnológica, mas também políticas públicas estruturantes, promovendo uma maior adaptabilidade e evolução da matriz energética.

O estudo de Paradisi *et al.* (2025) avalia diferentes tecnologias de propulsão no transporte urbano com foco na LCA, evidenciando que veículos elétricos e a hidrogênio (H_2) apresentam menor emissão total de GEE ao longo de todo o ciclo. Contudo, destaca-se que a fase de produção, especialmente de baterias e H_2, ainda concentra impactos ambientais relevantes. Em contrapartida, veículos a diesel mantêm maior impacto na fase operacional, devido à queima de combustíveis fósseis. Os resultados indicam que, à medida que a matriz energética se torna mais limpa, os benefícios das tecnologias eletrificadas aumentam significativamente.

Nessa perspectiva, os estudos de Prabhu e Mukhopadhyay (2024) indicam que a adoção de veículos elétricos promove impactos econômicos positivos, incluindo aumento do Produto Interno Bruto (PIB) e geração de empregos, especialmente associados à cadeia produtiva de baterias e infraestrutura energética. Do ponto de vista ambiental, observa-se redução significativa nas emissões de poluentes locais e GEE, podendo atingir entre aproximadamente 12% e 25% em cenários com maior participação de fontes renováveis na matriz elétrica. No entanto, quando a eletricidade é majoritariamente proveniente de carvão, parte desses benefícios é mitigada, evidenciando a dependência estrutural do setor energético. Além disso, o estudo aponta ganhos expressivos na saúde pública, relacionados à redução da incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares, à diminuição da mortalidade prematura e à queda nos custos com internações e tratamentos médicos. Em termos sistêmicos, a eletrificação contribui para a diminuição da dependência de combustíveis fósseis importados, embora a redução agregada das emissões totais seja mais modesta. Contudo, os resultados reforçam que os benefícios líquidos dependem de políticas integradas entre os setores de energia e transporte. Assim, a transição para veículos elétricos se mostra vantajosa, porém condicionada à descarbonização simultânea da matriz elétrica.

O estudo de caso em Singapura demonstrado por Yan *et al.* (2024) demonstra que a eletrificação em metrópoles pode reduzir as emissões de CO_2 em cerca de 40% ao longo do ciclo de vida, mesmo quando a matriz elétrica ainda depende de combustíveis fósseis como o gás natural. Contudo, os dados advertem que a fase de fabricação de veículos elétricos é até duas vezes mais intensiva em emissões do que a de veículos convencionais devido à produção de baterias. Assim, a sustentabilidade da frota não é imediata, mas condicionada à eficiência energética urbana e à quilometragem percorrida para compensar o débito de carbono inicial. O artigo reforça que, para a eletrificação ser uma solução ambiental plena, ela deve mitigar tanto os poluentes locais quanto as emissões globais integradas à infraestrutura energética.

A implementação da tecnologia *Vehicle-to-Grid* (V2G) pode reduzir as emissões de GEE do sistema elétrico em cerca de 10% a 20%, dependendo do cenário energético e da utilização de veículos elétricos. Essa redução ocorre principalmente pela melhor integração de fontes renováveis, como solar e eólica, reduzindo a necessidade de usinas térmicas de ajuda. No nível do ciclo de vida, veículos elétricos operando com V2G apresentam desempenho ambiental superior em comparação ao carregamento convencional. Contudo, o estudo de Wohlschlager *et al.* (2024) destaca que o aumento no uso das baterias pode intensificar impactos associados à sua degradação e produção. Ainda assim, os benefícios sistêmicos superam esses impactos adicionais em cenários com alta participação de energias limpas. Além disso, o V2G contribui para a estabilidade da rede elétrica, reduzindo picos de demanda e emissões associadas. Assim, pode-se dizer que a tecnologia tem potencial relevante de mitigação climática quando integrada a sistemas energéticos sem a alta utilização de carbono.

Varghese *et al.* (2025) apresentam uma discussão relevante ao destacar que, embora as políticas públicas de países como a China, Estados Unidos e Índia tenham impulsionado a adoção inicial da mobilidade elétrica, sua consolidação em larga escala ainda depende de avanços estruturais e tecnológicos significativos. A expansão para o mercado de massa exige o desenvolvimento de sistemas de carregamento inteligente, capazes de otimizar a demanda energética e mitigar impactos sobre a rede elétrica. Nesse contexto, a confiabilidade e a modernização da infraestrutura elétrica tornam-se elementos fundamentais para sustentar o crescimento da eletrificação. Ademais, persistem desafios socioeconômicos importantes, como o elevado custo inicial dos veículos e a desigualdade no acesso à infraestrutura de recarga, fatores que podem restringir a difusão da tecnologia, sobretudo em países em desenvolvimento. Paralelamente, o aprimoramento tecnológico, especialmente no que se refere à eficiência, durabilidade e custo das baterías, é essencial para ampliar a competitividade dos veículos elétricos. Dessa forma, a transição para a mobilidade elétrica em escala global requer uma abordagem integrada, que articule inovação tecnológica, políticas públicas eficazes e estratégias de inclusão socioeconômica.

Por fim, a análise comparativa no contexto do Kuwait feita pele pesquisa de Doust e Otkur (2023) evidencia que, a pesar de a matriz energética do país ser predominantemente baseada em combustíveis fósseis, os BEVs apresentam uma pegada de carbono significativamente inferior à dos ICEVs. Essa diferença decorre, sobretudo, da maior eficiência termodinâmica das usinas de geração de energia e dos motores elétricos, em contraste com a menor eficiência dos sistemas de combustão sob condições reais de condução. Os resultados indicam que a adoção de BEVs podem reduzir as emissões de CO_2 em até cerca de 50%, mesmo na ausência imediata de fontes renováveis na matriz elétrica. No entanto, ressalta-se que o potencial máximo de mitigação ambiental está condicionado à descarbonização do setor elétrico, especialmente no que se refere às emissões no ciclo *Well-to-Wheel*. Ademais, o estudo aponta que características locais, como padrões de tráfego urbano e altas temperaturas, podem favorecer o desempenho energético dos veículos elétricos, particularmente em situações de velocidade baixa. Nesse sentido, os BEVs configuram-se como uma alternativa viável para a redução das emissões em regiões fortemente dependentes do petróleo, desde que acompanhados por transformações estruturais na infraestrutura energética.

Comentários finais

Assim, de acordo com o estudo realizado, verifica-se que os veículos elétricos apresentam diversas vantagens em comparação aos ICEVs, especialmente em termos de eficiência energética e redução de emissões durante a fase de uso. Contudo, ainda há desafios a melhorar, como a produção, durabilidade e impacto ambiental das baterias, além da dependência da matriz elétrica para o carregamento.

Assim, embora os veículos elétricos reduzam a dependência de combustíveis fósseis na fase operacional, sua sustentabilidade depende da gestão eficiente dos recursos naturais e dos processos produtivos. Nesse contexto, a mitigação das mudanças climáticas por meio da mobilidade elétrica exige uma abordagem sistêmica, que considere simultaneamente emissões, uso de materiais e eficiência energética. Portanto, o avanço dessa transição deve ser acompanhado por políticas voltadas à

economia circular, reciclagem de baterias e uso responsável de recursos minerais, garantindo que os ganhos climáticos não sejam compensados por novos impactos ambientais.

Agradecimentos

Instituto Federal Fluminense pela apoio à realização da pesquisa.

Referências Bibliográficas

ALWOSHEEL, A.; KORONA, M. S. Context matters: Life cycle emissions and policy implications of electric vehicles in evolving carbon-intensive energy systems. **Energy**, v. 338, 2025.

COX, B. *et al*. Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. **Applied Energy**, v. 269, 2020.

DOUST, M.; OTKUR, M. Carbon footprint comparison analysis of passenger car segment electric and ICE propelled vehicles in Kuwait. **Alexandria Engineering Journal**, v. 79, p. 438-448, 2023.

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS (EPE). Balanço energético nacional 2025 – ano base 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025. Acesso em 29 abr. 2026.

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa* – 7 ed. São Paulo: **Editora Atlas Ltda**, 2002.

GRANDINETTI, F. J. *et al*. Analysis of the impact on GHG emissions from the adoption of electric vehicles in the vehicle fleet of the state of São Paulo, Brazil: Systematic review and ridge regression analysis. **Energy Strategy Reviews**, v. 61, 2025.

LU, Y.; GUO. L.; XIAO, R. Study on Carbon Emissions from Road Traffic in Ningbo City Based on LEAP Modelling. ***Sustainability***, v. 17, p. 39-69, 2025.

LEE, G.; PARK, S. Comparative analysis of total cost of ownership and well-to-wheel emissions for electric freight vehicles: A case study for South Korea. **Energy Conversion and Management: X**, v. 28, 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Combustíveis fósseis são maiores responsáveis pelo efeito estufa. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/combustiveis-fosseis-sao-maiores-responsaveis-pelo-efeito-estufa. Acesso em 29 abr. 2026.

MOHER, D. *et al*. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses**.** Ottawa: **The BMJ**, *2009*.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – BRASIL (ONU-BRASIL). COP26: transporte livre de combustíveis fósseis e propostas para texto final. Disponível em: https://news.un.org/pt/story/2021/11/1770042. Acesso em 30 abr. 2026.

PARADISI, B. P. *et al*. M. A techno-economic life cycle assessment of H_2 fuelled and electrified urban buses. **Applied Energy**, v. 401, 2025.

PRABHU, V. S.; MUKHOPADHYAY, K. The economic and environmental consequences of the electric vehicle transition in India. **Energy for Sustainable Development**, v. 81, 2024.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. *Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico* (2a). Novo Hamburgo: **Universidade Feevale,** 2013.

RINAWATI, D. I. *et al*. Potential for reducing CO_2 emissions from passenger cars in Japan by 2030 to achieve carbon neutrality. **IATSS Research**, v. 47, n. 2, p. 185-195, 2023.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). Sixth Assessment Report. Disponível em: https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/. Acesso em 30 abr. 2026.

VARGHESE, A. M.; PAUL, J.; PRADHAN, R. P. Research on Electric Vehicle Mobility: A Bibliometric Review and Research Agenda. **Transportation Research Procedia**, v 82, p. 1120-1137, 2025.

VILAÇA, M. *et al*. Life cycle assessment of shared and private use of automated and electric vehicles on interurban mobility. **Applied Energy**, v. 310, 2022.

WATARI, T. *et al*. Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 148, p. 91-103, 2019.

WOHLSCHLAGER, D. *et al*. Environmental effects of vehicle-to-grid charging in future energy systems – A prospective life cycle assessment. **Applied Energy**, v. 370, 2024.

YAN, W. *et al*. Assessing the environmental benefits of passenger cars electrification in metropolises: a case study of Singapore, **International Journal of Sustainable Transportation**, v. 19, p. 749-761, 2025.

ZHENG, G.; PENG, Z. Life Cycle Assessment (LCA) of BEV's environmental benefits for meeting the challenge of ICExit (Internal Combustion Engine Exit). **Energy Reports**, v. 7, p. 1203-1216, 2021.

NEXOS ENTRE FORMA URBANA E MODOS DE TRANSPORTE ADOTADOS EM CIDADES PEQUENAS E COMPACTAS: UM ESTUDO EMPÍRICO EM PIRATININGA (SP)

1 Vinicius Luis Arcangelo Silva, 2 Leticia Moreira Sigolo
1 Pontifícia Universidade Católica de Campinas, e-mail: viniciusarcangelo@gmail.com;
2 Pontifícia Universidade Católica de Campinas, e-mail: lesigolo@gmail.com

Palavras-chave: Cidade pequena; Mobilidade urbana sustentável; Morfologia urbana.

Resumo

Este artigo analisa a relação entre forma urbana, movimentos pendulares e modo de transporte adotado em Piratininga (SP), cidade de pequeno porte e de configuração urbana compacta. Parte-se da hipótese de que as curtas distâncias e a proximidade funcional favorecem os modos ativos. O problema central consiste em compreender por que, mesmo nesse contexto morfológico potencialmente favorável, predomina o uso do automóvel, inclusive em viagens curtas e deslocamentos intraurbanos, além dos intermunicipais. A pesquisa adota estudo de caso com abordagem quantitativa e qualitativa, combinando levantamento de deslocamentos pendulares, análise de indicadores morfológicos e dados secundários do IBGE, como do Censo Demográfico, da PNAD Contínua, sobre deslocamentos pendulares, além de observações de campo sobre infraestrutura viária e uso do solo. Os resultados indicam que, apesar da compacidade e da malha conectada, a baixa qualidade do ambiente para pedestres e ciclistas, a priorização do tráfego motorizado e a relevância dos fluxos pendulares mantêm elevada a dependência do automóvel. Conclui-se que a forma urbana compacta, isoladamente, não garante mobilidade sustentável, exigindo políticas integradas do desenho urbano, infraestrutura e planejamento regional.

Introdução

A relação entre a configuração espacial das cidades e os padrões de deslocamento da população constitui um tema central no campo do planejamento urbano e dos estudos sobre mobilidade sustentável. A literatura produzida a partir da década de 1990, com destaque para estudos empíricos desenvolvidos nos Estados Unidos, Europa e, posteriormente, no Sul Global, especialmente na América Latina, tem demonstrado que a forma urbana influencia de maneira significativa a escolha do modo de transporte adotado, as distâncias percorridas, o tempo de viagem e os impactos ambientais associados ao transporte, especialmente em contextos onde o uso do automóvel se consolidou como modo dominante (CERVERO; KOCKELMAN, 1997; VAN DE COEVERING; SCHWANEN, 2008; MAGAGNIN; SILVA, 2008; BANISTER, 2008; EWING; CERVERO, 2010; CARVALHO; PEREIRA, 2012; GOMIDE; GALINDO, 2013; DE VOS, 2015; GOUVEIA; FERREIRA, 2018; GUIMARÃES et al., 2021; GONZAGA; PORTUGAL; KNEIB, 2024; MEIRA et al., 2024; SILVA; SÍGOLO, 2025).

Modelos urbanos marcados pela dispersão territorial, pela separação rígida de usos do solo, pela baixa conectividade viária e pela limitada rede de transporte coletivo tendem a ampliar a dependência do transporte individual motorizado, elevando o consumo energético e dificultando a adoção de modos coletivos e ativos. Em contraste, configurações mais compactas, caracterizadas por maior proximidade funcional, diversidade de usos e continuidade do sistema viário, são frequentemente associadas à redução das distâncias médias de deslocamento e ao maior potencial para caminhadas e uso da bicicleta (SOUTHWORTH, 2005; GEHL, 2013; SILVA, 2021).

No plano teórico, consolida-se a compreensão de que atributos morfológicos e funcionais — como densidade, diversidade de usos, desenho urbano e acessibilidade aos destinos cotidianos — exercem influência direta sobre o comportamento e o padrão de viagens e deslocamentos. Esses elementos, sistematizados em abordagens amplamente difundidas, permitem avaliar como o ambiente construído condiciona as oportunidades e restrições associadas às escolhas dos modos de transporte a serem utilizados (CERVERO; KOCKELMAN, 1997; EWING; CERVERO, 2010, SILVA, 2021).

Entretanto, estudos (GOUVEIA; FERREIRA, 2018; GUIMARÃES et al., 2021; SILVA, 2021; GONZAGA; PORTUGAL; KNEIB, 2024; MEIRA et al., 2024; SILVA; SÍGOLO, 2025) indicam que a presença desses atributos, isoladamente, não garante padrões de mobilidade mais sustentáveis. Fatores como a qualidade do espaço público, a segurança viária, a priorização histórica do automóvel nas políticas urbanas e os aspectos culturais associados ao deslocamento cotidiano podem neutralizar os potenciais benefícios da compacidade urbana, mantendo elevada a participação do transporte individual mesmo em contextos de curtas distâncias de percursos cotidianos (BANISTER, 2008; VASCONCELLOS, 2014; BARBOSA, COSTA, 2021; SILVA, 2021).

No contexto brasileiro, os municípios de pequeno porte, com menos de 50 mil habitantes, que representam mais de 70% (3.941) dos 5.569 municípios do país e cerca de 60% (506) dos municípios paulistas, com menos de 50 mil habitantes(IBGE, 2022), apresentam dinâmicas próprias de mobilidade que demandam maior aprofundamento analítico. Conforme revelam os dados de deslocamento do Censo Demográfico 2022 (IBGE, 2025), há uma elevada taxa de motorização individual mesmo em cidades de pequena extensão territorial. Ao correlacionar a densidade demográfica e os tempos de viagem, nota-se que a curta distância entre origem e destino não inibe o uso do automóvel. Esse fenômeno corrobora a tese de Vasconcellos (2001), que aponta que a escolha do modal não é meramente funcional, mas influenciada por políticas públicas que historicamente

priorizaram o transporte individual. Assim, como argumentam Kenworthy e Laube (1999), a proximidade espacial, sem infraestrutura adequada para modos ativos, acaba sucumbindo à 'dependência do automóvel', evidenciando que fatores de conveniência e status prevalecem sobre a lógica da proximidade física.

Esse aparente descompasso entre potencial morfológico e comportamento efetivo de viagem e de escolha modal reforça a necessidade de análises integradas que articulem forma urbana, uso do solo, sistema viário e condicionantes socioespaciais, econômicos e ambientais em diferentes escalas. A mobilidade deve ser compreendida como um fenômeno socioespacial complexo. Segundo Vasconcellos (2014, p. 15), ela é o resultado da interação entre a estrutura física e as práticas sociais, pois "depende tanto da forma como a cidade é construída e as atividades são distribuídas no espaço, quanto das condições sociais e econômicas" que regem o cotidiano urbano. Neste sentido, um estudo desenvolvido por Carvalho, Guedes e Lima Neto (2018) destaca que: "As características da mobilidade são compostas basicamente por fatores individuais e familiares, que podem ser entendidos como as características sociais, e por fatores externos, características econômicas de maneira geral, que conjuntamente compõem as condições para que os deslocamentos ocorram e que a mobilidade se efetive." (IPEA, 2018, p.61)

Diante desse cenário, o presente artigo fundamenta-se em uma abordagem teórica e empírica que busca discutir de que maneira a forma urbana condiciona os padrões de deslocamento, com ênfase em cidades de pequeno porte e de configuração espacial compacta. Ao articular contribuições da morfologia urbana e dos estudos de mobilidade, o trabalho estabelece o referencial analítico que subsidia a interpretação dos resultados empíricos apresentados ao final.

A forma e a mobilidade urbana

A forma urbana pode ser entendida como o arranjo espacial dos elementos que estruturam a cidade, englobando a organização do sistema viário, a distribuição das edificações, a densidade construída, a diversidade de usos do solo e a configuração dos espaços públicos. Essa estrutura exerce papel determinante sobre os padrões de deslocamento, influenciando tanto a necessidade quanto a escolha do modo de transporte utilizado pela população (CERVERO; KOCKELMAN, 1997; EWING; CERVERO, 2010; SILVA, 2021; HANDY; BOARNET; EWING, 2021; MOURA; GOMES, 2022).

A mobilidade urbana, nesse sentido, não resulta apenas das preferências individuais, mas é condicionada pelas oportunidades e restrições impostas pelo ambiente construído. Cidades mais compactas, constituídas por usos mistos e estruturas viárias que favorecem percursos menores e mais diretos, tendem a ampliar o leque de escolhas modais nos deslocamentos diários de sua população, enquanto estruturas dispersas e fragmentadas, e orientadas ao uso do automóvel, reforçam padrões de deslocamento motorizado e individuais (BANISTER, 2008).

A escolha modal é amplamente influenciada pela relação entre origem e destino das viagens, pela estrutura do tecido urbano e pela forma como os deslocamentos se inserem no cotidiano das atividades urbanas. Cervero e Kockelman (1997) e Ewign e Cervero (2010) demonstram que áreas urbanas com maior densidade, diversidade funcional e conectividade viária apresentam menor taxa de uso do automóvel e maior participação dos modos ativos e coletivos. Entretanto, Carvalho, Guedes e Lima Neto (2018, p. 57) evidencia que "a mobilidade urbana caminhou para uma divisão entre os modos de transporte na qual os veículos motorizados passaram a ser dominantes". Mesmo em contextos espacialmente favoráveis, a ausência de políticas integradas de mobilidade e o predomínio de um modelo urbano historicamente orientado ao automóvel podem manter elevados níveis de dependência do transporte individual (VASCONCELLOS, 2014). Assim, a forma urbana deve ser analisada em conjunto com as práticas sociais e político-institucionais que moldam e orientam o uso e a ocupação do espaço urbano.

A compacidade urbana refere-se à concentração das atividades e da população em um território relativamente limitado, reduzindo a extensão da mancha urbana e as distâncias médias de deslocamentos diários (MEIRA et al., 2024; GARREFA et al., 2024). Em termos teóricos, cidades compactas tendem a favorecer viagens mais curtas e a viabilizar deslocamentos a pé ou por bicicleta, sobretudo quando associadas a níveis adequados de densidade e diversidade de usos (EWING; CERVERO, 2010; SOUTHWORTH, 2005).

A conectividade da malha viária, expressa pela densidade de interseções e pela regularidade das quadras, exerce influência direta sobre a eficiência e a atratividade dos percursos realizados por modos não motorizados, na medida em que amplia as possibilidades de escolha de rotas e reduz distâncias efetivas de deslocamento (EWING; CERVERO, 2010). Malhas contínuas e permeáveis reduzem desvios, ampliam as alternativas de trajeto e favorecem deslocamentos mais diretos, enquanto sistemas viários hierarquizados e fragmentados tendem a priorizar os modos motorizados em detrimento dos modos ativos e da circulação local (CERVERO; KOCKELMAN, 1997; EWING; CERVERO, 2010; MARSHALL; GARRICK, 2010).

O desenho do sistema viário constitui elemento central na relação entre forma urbana e mobilidade urbana. A predominância de vias largas, com permissão de altas velocidades, cujo desenho se volta ao escoamento do tráfego motorizado, tende a desestimular os modos ativos, mesmo em áreas cujos deslocamentos cotidianos da população local envolvem curtas distâncias. Por outro lado, redes viárias com hierarquia clara, seções compatíveis com o uso urbano e tratamento adequado das travessias contribuem para maior equilíbrio entre os diferentes modos de transporte (VASCONCELLOS, 2014).

A distribuição dos usos do solo desempenha papel decisivo na estrutura das viagens urbanas. A proximidade funcional entre habitação, trabalho, educação, lazer, comércio e serviços reduz a necessidade de deslocamentos longos e amplia o potencial de adoção de modos ativos (SILVA, 2021). Cidades com uma rede de centralidades bem estruturada tendem a apresentar maior diversidade nos padrões de deslocamentos e nas escolhas dos modos de transporte adotados e, consequentemente, menor dependência do automóvel (CERVERO; KOCKELMAN, 1997; EWING; CERVERO, 2010).

Entretanto, a simples coexistência espacial de diferentes usos não assegura, por si só, padrões sustentáveis de mobilidade. A acessibilidade efetiva aos destinos depende da qualidade dos percursos, da continuidade das calçadas, da

segurança viária e da percepção de conforto do usuário. Dados recentes do Censo Demográfico 2022 indicam que, mesmo em municípios onde trabalho e estudo se localizam a curtas distâncias da residência, parcela significativa da população opta pelo automóvel, evidenciando a influência de fatores que extrapolam a lógica puramente espacial (IBGE, 2025).

A infraestrutura destinada aos modos ativos constitui elemento mediador entre forma urbana e comportamento de deslocamento da população. Calçadas descontínuas, ausência de qualidade ambiental e urbanística para os percursos peatonais e de infraestrutura cicloviária, além de conflitos em cruzamentos e na destinação da via entre os diferentes modais reduzem a atratividade da caminhada e do uso da bicicleta, mesmo quando as distâncias são compatíveis com esses modos (SOUTHWORTH, 2005; VASCONCELLOS, 2014, SILVA; SIGOLO, 2025).

Nesse sentido, a mobilidade sustentável depende não apenas da organização espacial da cidade, mas da qualificação do ambiente construído, capaz de transformar o potencial morfológico em prática cotidiana de deslocamento.

Por fim, a escolha modal também é fortemente influenciada por fatores socioeconômicos e culturais, como renda, acesso ao automóvel, percepção de *status,* hábitos de deslocamento e sensação de segurança.

Assim, a análise da relação entre forma urbana e mobilidade deve ser compreendida de maneira sistêmica, articulando estrutura espacial, uso do solo, infraestrutura e práticas sociais, especialmente em contextos não metropolitanos, onde os desafios da mobilidade assumem contornos específicos. Além desses fatores intraurbanos e locais, deve-se considerar a inserção regional de cada localidade, posto que há complementariedades e interdependências entre cidades em uma rede hierárquica de influência (REGIC, 2018).

Movimento pendulares

O conceito de movimento pendular refere-se aos deslocamentos cotidianos realizados entre o local de residência e os principais destinos para o exercício de outras atividades, sobretudo relacionadas ao trabalho e ao estudo, caracterizando fluxos regulares e repetitivos no espaço intraurbano e regional (IBGE, 2023). Esses deslocamentos configuram uma dimensão fundamental da mobilidade urbana, pois expressam a relação funcional entre moradia, emprego, oferta educacional e organização territorial das cidades (CORRÊA, 2001; SANTOS, 2008).

O movimento pendular é compreendido como um importante indicador da articulação espacial entre municípios e de sua inserção em redes urbanas mais amplas, refletindo a organização funcional do território e a distribuição desigual de oportunidades (IBGE, 2020; LOBO et al., 2018). Em contextos não metropolitanos, especialmente em cidades de pequeno porte, os fluxos pendulares revelam tanto limitações da oferta local de emprego e serviços quanto padrões de dependência funcional em relação a centros urbanos próximos, evidenciando a centralização das atividades econômicas e a hierarquização da rede urbana (MEIRA; OLIVEIRA; PIRES, 2024; OLIVEIRA et al., 2025).

Sob a perspectiva da mobilidade urbana, o movimento pendular também permite avaliar a eficiência da estrutura urbana local. Altos índices de deslocamento externo diário podem indicar descompasso entre o uso do solo residencial e a localização das atividades produtivas e educacionais, ampliando as distâncias de viagem e reforçando a dependência de modos de transporte motorizados, sejam eles individuais ou coletivos de caráter regional. Esse cenário está inserido em um contexto mais amplo da mobilidade urbana brasileira, no qual “as cidades brasileiras enfrentam problemas de poluição, acidentes de trânsito, congestionamento e a qualidade do transporte público é insatisfatória [...] O número de automóveis e motocicletas aumenta muito rapidamente e as cidades crescem sem controle.” (VASCONCELLOS, 2014, p. 5).

Além disso, o estudo dos movimentos pendulares contribui para a compreensão dos impactos territoriais da mobilidade, como a sobrecarga das infraestruturas viárias, o aumento do tempo de deslocamento e a intensificação das desigualdades socioespaciais, especialmente quando associados a redes de transporte pouco integradas ou insuficientes (SANTOS, 2008; BANISTER, 2008).

Metodologia

A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso de abordagem quantitativa e qualitativa, com base em dados primários e secundários, tendo como recorte de análise o município de Piratininga, localizado na região centro-oeste do estado de São Paulo. A opção pelo estudo de caso justifica-se pela possibilidade de aprofundamento analítico em contexto urbano específico, permitindo a articulação entre características da forma urbana, padrões de deslocamento e escolhas do modo de transporte adotado pela população, conforme defendido por Yin (2015).

Os dados primários foram obtidos por meio de levantamento amostral de deslocamentos domiciliares, contemplando informações relativas ao modo de transporte utilizado, distância percorrida, motivo da viagem, tempo de deslocamento e perfil socioeconômico dos respondentes de acordo com a pesquisa realizada por Silva (2021). Complementarmente, foram realizadas observações de campo para caracterização das condições do sistema viário, da infraestrutura de mobilidade para pedestres e ciclistas, da malha urbana e do uso do solo.

Os dados secundários foram extraídos de bases oficiais, especialmente do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), da Fundação SEADE e de documentos do sistema de planejamento urbano municipal, incluindo o Plano Diretor, além de bases cadastrais. Essas informações subsidiaram a análise da estrutura urbana, da densidade demográfica, da extensão da mancha urbana e da hierarquia viária, principalmente.

A forma urbana foi analisada a partir de indicadores morfológicos, tais como: i) compacidade territorial, expressa pela relação entre área urbanizada e população, conforme abordagens de densidade urbana e uso do solo (EWING; CERVERO, 2010; ITDP, 2018); ii) conectividade da malha viária, avaliada pela densidade de interseções e pelo tamanho médio das quadras,

conforme métricas de desenho urbano associadas à caminhabilidade (EWING; CERVERO, 2010; MARSHALL; GARRICK, 2010); iii) proximidade funcional, medida pela distância média entre áreas residenciais e principais polos geradores de viagens (comércio, serviços e equipamentos públicos), com base nos princípios de acessibilidade urbana e uso misto do solo (EWING; CERVERO, 2010; SOUTHWORTH, 2005); iv) continuidade e qualidade dos espaços para pedestres, considerando largura de calçadas, presença de obstáculos, arborização e segurança viária, conforme diretrizes de avaliação do ambiente construído e caminhabilidade propostas pelo ITDP (2018).

A relação entre os indicadores morfológicos e a escolha do modo de transporte foi baseada no cruzamento entre variáveis espaciais e comportamentais, permitindo identificar associações entre a forma urbana e os padrões de deslocamento. Os indicadores foram previamente operacionalizados em métricas mensuráveis — como densidade de interseções (n/km²), tamanho médio das quadras (m), densidade populacional (hab/ha) e distância média aos polos geradores de viagens (comercio, serviço, educação e lazer) — e relacionados aos dados de mobilidade obtidos por meio de levantamento in loco (SILVA, 2021). A análise considerou diferentes grupos de usuários, definidos a partir de critérios socioeconômicos (faixa de renda), demográficos (faixa etária) e funcionais (motivo da viagem: trabalho, estudo e outros), possibilitando a identificação de padrões diferenciados de escolha modal. Metodologicamente, adotou-se análise descritiva e comparativa, complementada por observações de campo sistematizadas, permitindo integrar dimensões objetivas — como infraestrutura, acessibilidade e configuração espacial — e subjetivas, relacionadas às condições de conforto, segurança e atratividade do ambiente construdo.

Caracterização Urbana de Piratininga (SP)

Piratininga é um município de pequeno porte – caracterizado pelo IBGE – localizado no interior do estado de São Paulo, integrante da Região Administrativa de Bauru. Segundo dados do Censo/IBGE (2022), possui uma população de 15.108 habitantes, com projeção estimada de 15.554 em 2024, e área urbana relativamente compacta, com expansão territorial contida – com extensão máxima de 2,5km - e forte concentração das atividades centrais em um núcleo principal (SILVA, 2021).

A estrutura urbana caracteriza-se por malha viária predominantemente ortogonal, com quadras de dimensões regulares e baixa hierarquia funcional entre as vias, excetuando-se os eixos arteriais de ligação regional (acesso às rodovias). A densidade demográfica média é baixa (37,54hab/km²) se comparada à do estado de São Paulo de 181,9 hab./km², bastante semelhante à de Agudos de 38,98 hab/km² e bastante inferior à de Bauru, de 567 hab. /km², ambos vizinhos. E com predomínio de uso residencial unifamiliar e presença de centralidades comerciais e de serviços localizadas no entorno da área central histórica, recentemente com crescimento adjacente a um polo industrial e conjuntos residenciais unifamiliares mais recentes.

A distância média entre bairros residenciais e o centro urbano é reduzida, situando-se, em grande parte dos casos, abaixo de 2,5 km, o que, do ponto de vista morfológico, configura um território potencialmente favorável à caminhabilidade e deslocamentos por bicicleta, conforme parâmetros discutidos por Gehl (2013) e Southworth (2005), entre outros, relacionados à escala humana, à conectividade, à diversidade de usos do solo, à intermodalidade, bem como à segurança e às experiências do usuário.

Contudo, o levantamento de campo revela gargalos significativos na infraestrutura voltada aos modos ativos. A experiência do pedestre e do ciclista é comprometida por descontinuidades nas calçadas e pela inexistência de malha cicloviária, somadas a conflitos críticos em pontos de travessia e a uma mala viária projetada em beneficio dos modos motorizados.



(a)



(b)

Figura 01: Cruzamento de 8 vias no centro da cidade, Av. Cel. Soares com a Rua Lisboa Jr. (a); Av. Cel. Soares com insuficiência na microacessibilidade (b).
Fonte: Silva (2021) e Google Earth Pro (2026)

Tais características reforçam o padrão apontado por Vasconcellos (2014, p. 15) para cidades brasileiras, nas quais o desenho urbano historicamente prioriza o automóvel, mesmo em contextos de baixa complexidade espacial que "refere-se a áreas urbanas caracterizadas por uma organização espacial simples, com menor densidade de atividades e, frequentemente, com infraestrutura limitada."

Os dados do Censo Demográfico 2010 (IBGE) indicam que aproximadamente 45% da população ocupada residente em Piratininga (SP) exercia suas atividades fora do município, evidenciando uma forte dependência funcional em relação a centros urbanos próximos, sobretudo Bauru, principal polo regional localizado a cerca de 13 km de distância. Dados mais recentes do

Censo Demográfico de 2022 apontam a manutenção desse padrão de elevada mobilidade pendular, ainda que com limitações quanto à divulgação detalhada das matrizes origem-destino, indicando que uma parcela significativa da população continua realizando deslocamentos intermunicipais para trabalho e estudo. Esses deslocamentos pendulares intermunicipais ocorrem predominantemente por meio de transporte individual motorizado, padrão recorrente em municípios de pequeno porte inseridos em áreas de influência urbana de outras cidades maiores, de médio e grande porte.

Em termos comparativos, no estado de São Paulo, dados do Censo de 2010 indicam que cerca de 25% a 30% dos trabalhadores realizavam deslocamentos intermunicipais diários, valor significativamente inferior ao observado em Piratininga, o que reforça a intensidade relativa dos fluxos pendulares no município analisado. Evidências mais recentes extraídas do Censo 2022 sugerem a continuidade desse padrão, com destaque nas regiões metropolitanas. Dados do perfil dos municípios paulistas (SEADE, 2026) reforçam que o fenômeno da mobilidade pendular é mais acentuado em cidades de pequeno porte vinculadas a polos regionais, refletindo a dependência funcional em relação à oferta de empregos e serviços dos centros urbanos de maior posição na hierarquia da rede urbana.

Nesse contexto, os dados evidenciam que, mesmo em uma cidade com dimensões territoriais reduzidas e estrutura urbana relativamente compacta, os fluxos pendulares exercem papel central na organização da mobilidade cotidiana, contribuindo para a manutenção de elevados níveis de dependência do transporte individual motorizado e limitando o potencial de adoção de modos ativos nos deslocamentos diários.

Ainda que Piratininga apresente distâncias internas compatíveis com deslocamentos a pé ou por bicicleta, os dados sobre movimentos pendulares extraídos dos censos de 2010 e 2022 revelam que as viagens intermunicipais têm peso relevante na estrutura da mobilidade local. Esses deslocamentos, em sua maioria, são realizados por modos motorizados, o que amplia o tempo de viagem, o consumo energético e os custos associados ao transporte cotidiano, tanto para os indivíduos quanto para o sistema urbano regional.

Esse padrão se diferencia significativamente daquele observado em municípios polo, como Bauru e Marília, nos quais a maior concentração de empregos, serviços e equipamentos urbanos resulta em menor proporção relativa de deslocamentos pendulares externos. Dados do Censo de 2010 indicam que em Bauru essa proporção era inferior a 15%, e em Marília situava-se em torno de 18%, evidenciando maior retenção da população ocupada nesses centros urbanos. Nesses casos, embora também existam fluxos intermunicipais, há maior concentração de atividades econômicas no próprio território municipal, reduzindo a necessidade de deslocamentos externos.

Em contrapartida, cidades de menor porte inseridas na área de influência desses polos, como Agudos e Pederneiras, apresentam padrões semelhantes aos de Piratininga. Ainda segundo dados do Censo de 2010, esses municípios registraram proporções de deslocamentos intermunicipais frequentemente superiores a 30% da população ocupada, refletindo a dependência funcional em relação a centros regionais. Esse quadro reforça a existência de uma estrutura urbana hierarquizada, na qual municípios menores assumem papel predominantemente residencial, enquanto os polos concentram empregos e serviços especializados. Esse padrão evidencia que a mobilidade pendular não é exclusividade das áreas metropolitanas, mas um fenômeno multiescalar e que envolve toda a rede de cidades paulista, com intensidades e padrões variados.

O cotejamento dos movimentos pendulares de Piratininga com o do conjunto do estado de São Paulo permite compreender que, embora o volume dos deslocamentos seja distinto, a lógica territorial que os engendra é semelhante: a especialização funcional dos municípios e a concentração regional das atividades produzem deslocamentos cotidianos que desafiam os modelos de planejamento e gestão do território circunscritos à escala municipal.

Dessa forma, a análise dos movimentos pendulares reforça a necessidade de políticas de mobilidade e de planejamento e gestão territoriais integradas e em diferentes escalas, capazes de articular uso e ocupação do solo, infraestrutura de transporte, desenvolvimento econômico e preservação ambiental. Para cidades pequenas, como Piratininga, compreender esses fluxos pendulares é fundamental para interpretar corretamente os padrões de deslocamento observados e os modos de transporte adotados, e para avaliar os limites do potencial morfológico local na promoção de uma mobilidade mais sustentável.

Resultados: forma urbana, padrões de deslocamento e escolha do modo de transporte adotado

Os dados investigados sobre os deslocamentos em Piratininga evidenciam que, apesar da compacidade territorial e das curtas distâncias médias percorridas, o automóvel constitui o principal modo de transporte utilizado pela população local. Observa-se uma participação reduzida dos modos ativos, especialmente de bicicleta, e o uso moderado da caminhada, concentrado, sobretudo, em viagens de curta extensão e associadas a atividades de compras e à utilização de serviços públicos localizados na área central do município.

A análise da distribuição modal das viagens no município revela que percursos com distância inferior a 1,5 km, que se enquadrariam em condição confortável para a sua realização a pé, como destacam Gehl (2013) e Southworth (2005), apresentam participação significativa do automóvel. Tal resultado confirma estudos desenvolvidos por Magagnin e Silva (2015), que apontam a persistência da cultura do transporte motorizado individual, mesmo em cidades pequenas, onde a proximidade espacial se apresentaria como um condicionante favorável aos modos não motorizados.

A conectividade da malha viária de Piratininga, caracterizada por quadras relativamente curtas e elevada densidade de interseções, configura um aspecto positivo para a caminhabilidade, conforme os parâmetros propostos por Ewing e Cervero (2010), entretanto, revela-se insuficiente dada à reduzida qualidade do ambiente construído evidenciada pela descontinuidade das calçadas, ausência de sombreamento e insegurança viária em cruzamentos, reduzindo a atratividade dos deslocamentos a pé, e limitando o aproveitamento desse potencial morfológico.

No que se refere à proximidade funcional, verifica-se que a maior parte dos equipamentos públicos, estabelecimentos comerciais e de serviços concentra-se em um núcleo central, implicando, para o seu acesso, trajetos relativamente curtos para grande parte da população moradora. Todavia, a ausência de estabelecimentos comerciais e de serviços especializados exige deslocamentos intermunicipais, e trajetos mais longos, como, por exemplo, para o município de Bauru. Além disso, a fragmentação de parte da malha urbana, com o destacamento de alguns bairros, associada à presença de eixos viários de tráfego rápido e à escassez de travessias qualificadas, constitui barreira física e perceptiva para os modos ativos, reforçando a preferência pelo automóvel.

A análise do padrão de deslocamento por faixa etária indica que jovens e adultos em idade economicamente ativa adotam predominantemente o modo de transporte motorizado individual, enquanto idosos recorrem com mais frequência à caminhada em percursos locais (SILVA, 2021). Tal padrão evidencia que a escolha do modo de transporte não se deve apenas a condicionantes espaciais locais, mas também à estrutura produtiva e à distribuição das oportunidades de geração de renda e trabalho em escala regional.

Considerações finais

Os resultados obtidos permitem afirmar que a compacidade urbana, embora constitua condição necessária para a promoção da mobilidade sustentável, não é suficiente, por si só, para induzir a adoção dos modos ativos em cidades de pequeno porte. A experiência de Piratininga evidencia que a forma urbana favorável, caracterizada por distâncias reduzidas e malha viária relativamente conectada, convive com padrões de deslocamento fortemente tributários do automóvel.

Corroborando Banister (2008), a mudança nos padrões de deslocamentos e nas escolhas dos modos de transporte depende de um conjunto articulado de políticas e ações, envolvendo diversidade no uso e ocupação do solo, no desenho urbano, nas densidades urbanas, na infraestrutura, planejamento e gestão da mobilidade e em condições mais equitativa, em seus aspectos socioeconômicos e ambientais, da inserção regional das distintas localidades que constituem a rede brasileira de cidades. A predominância de seções viárias voltadas ao fluxo motorizado, a ausência de redes cicloviárias contínuas e a baixa qualidade dos espaços destinados ao pedestre limitam a conversão das vantagens espaciais presentes em Piratininga em práticas cotidianas de deslocamento mais sustentáveis.

À luz de Ewing e Cervero (2010), observa-se que, embora os “Ds” da densidade e da diversidade estejam relativamente presentes no município, os atributos relacionados ao desenho urbano e à qualidade do ambiente construído destinado à circulação não atingem níveis capazes de estimular mudanças comportamentais significativas. À luz de Jacobs (2011) e Gehl (2013), acrescenta-se que a vitalidade e a segurança dos espaços públicos são elementos centrais para a apropriação da cidade pelo pedestre, como espaços culturais, de sociabilidade e de lazer, o que se mostra incipiente no caso analisado.

Portanto, o estudo demonstrou que, em Piratininga, a forma urbana compacta e a proximidade entre funções urbanas configuram condições estruturais favoráveis aos deslocamentos não motorizados. Entretanto, tais características não se traduzem, do ponto de vista da mobilidade, em maior participação dos deslocamentos a pé e de bicicleta, em virtude de limitações relacionadas à assimetria na distribuição das oportunidades de trabalho e de estudo, ao desenho urbano, à infraestrutura de mobilidade e à cultura associada ao uso do automóvel.

Conclui-se que a promoção da mobilidade sustentável em cidades de pequeno porte demanda a articulação entre políticas de uso e ocupação do solo, qualificação do espaço público e intervenções no sistema viário, capazes de transformar o potencial morfológico existente em mudanças efetivas no comportamento e padrões dos deslocamentos. Nesse sentido, a mobilidade ativa não decorre apenas da compacidade urbana, mas da integração entre forma urbana, desenho do espaço público e estratégias de planejamento que operem simultaneamente na escala local e regional, incorporando também dimensões ambientais e socioeconômicas.

Estudos futuros podem aprofundar a análise por meio de modelagens espaciais e avaliações comparativas com outros municípios de pequeno porte, ampliando a compreensão dos determinantes da escolha modal em contextos não metropolitanos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

Referências Bibliográficas

BANISTER, David. The sustainable mobility paradigm. Transport Policy, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 73-80, mar. 2008.

BARBOSA, Cássio; COSTA, Heloisa Soares de Moura. Mobilidade urbana e desigualdades socioespaciais no Brasil. Cadernos Metrópole, São Paulo, v. 23, n. 51, p. 7-26, 2021.

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro de; PEREIRA, Rafael Henrique Moraes. Efeitos da mobilidade urbana sobre a inclusão social no Brasil. Brasília: Ipea, 2012. (Texto para Discussão, n. 1706).

CERVERO, Robert; KOCKELMAN, Kara. Travel demand and the 3Ds: density, diversity, and design. Transportation Research Part D: Transport and Environment, [S. l.], v. 2, n. 3, p. 199-219, 1997.

CORRÊA, Roberto Lobato. Trajetórias geográficas. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

DE VOS, Jonas; WITLOX, Frank. Travel satisfaction revisited: on the pivotal role of travel satisfaction in conceptualising a travel behaviour process. Transportation Research Part A: Policy and Practice, [S. l.], v. 106, p. 364-373, dez. 2017.

EWING, Reid; CERVERO, Robert. Travel and the built environment: a meta-analysis. Journal of the American Planning Association, [S. l.], v. 76, n. 3, p. 265-294, 2010.

GEHL, Jan. Cidades para pessoas. 3. ed. São Paulo: Perspectiva, 2013.

GOMIDE, Alexandre de Ávila; GALINDO, Ernesto Pereira. A mobilidade urbana: uma agenda inconclusa ou o retorno daquilo que não foi. Brasília: Ipea, 2013. (Texto para Discussão, n. 1854).

GONZAGA, Ana Stéfany da Silva; PORTUGAL, Licínio da Silva; KNEIB, Érika Cristine. Planejamento do sistema de mobilidade urbana e inclusão social em cidades brasileiras. Revista de Direito da Cidade, Rio de Janeiro, v. 16, n. 1, 2024.

GOUVEIA, Camilla Ferreira; FERREIRA, William Rodrigues. Mobilidade urbana em pequenas cidades: a experiência de Sacramento/MG. Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia, Uberlândia, v. 10, n. 3, p. 100-117, 2018.

GUIMARÃES, Bruna Rodrigues et al. A vital necessidade da mobilidade urbana nas cidades brasileiras. GeoSertões, Cajazeiras, v. 6, n. 11, p. 49-61, 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: https://www.ibge.gov.br. Acesso em: 11 abr. 2026.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2022: Primeiros resultados de população e domicílios. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br. Acesso em: 11 abr. 2026.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Regiões de influência das cidades: REGIC 2018. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101728.pdf. Acesso em: 11 abr. 2026.

IBGE. Censo Demográfico 2022: Deslocamentos para trabalho e estudo. Rio de Janeiro: IBGE, 2025.

ITDP BRASIL – INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE & DESENVOLVIMENTO. Padrão TOD: guia de desenvolvimento urbano orientado ao transporte sustentável. 3. ed. Rio de Janeiro: ITDP Brasil, 2018.

JACOBS, Jane. Morte e vida de grandes cidades. 3. ed. São Paulo: WMF Martins Fontes, 2011.

KENWORTHY, J. R.; LAUBE, F. B. Patterns of automobile dependence in cities: an international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy. Transport Reviews, 1999.

KLINK, Jeroen Johannes. A cidade-região: regionalismo e reestruturação no Grande ABC paulista. São Paulo: Difel, 2010.

LOBO, Carlos et al. Mobilidade pendular e autossuficiência econômica na periferia metropolitana. Revista Geografias, Belo Horizonte, v. 14, n. 1, p. 54-71, 2018.

MAGAGNIN, Renata Cardoso; SILVA, Antônio Nélson Rodrigues da. A percepção do especialista sobre o tema mobilidade urbana. Transportes, Rio de Janeiro, v. 16, n. 1, p. 25-35, 2008.

MARSHALL, Wesley E.; GARRICK, Norman W. Street network types and road safety. Accident Analysis & Prevention, [S. l.], v. 42, n. 1, p. 1-9, 2010.

MEIRA, Leonardo Herszon; OLIVEIRA, Leise Kelli de; PIRES, Dannúbia Ribeiro. Identificação de estratégias de mobilidade para municípios brasileiros pequenos e urbanizados. Revista Baru: Revista de Políticas Públicas e Desenvolvimento Regional, Goiânia, v. 10, e13397, 2024.

OLIVEIRA, Aline Alves de; MACHADO, Danielle Carusi; QUEIROZ, Silvana Nunes de. Mobilidade pendular nas regiões metropolitanas cearenses: uma análise a partir dos dados censitários. Revista de Economia Regional, Urbana e do Trabalho, Natal, v. 13, n. 1, p. 131-152, 2025.

SANTOS, Milton. A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção. 4. ed. São Paulo: Edusp, 2008.

SEADE – FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS. Perfil dos Municípios Paulistas. São Paulo: SEADE, 2026. Disponível em: https://perfil.seade.gov.br/. Acesso em: 11 abr. 2026.

SILVA, Vinicius Luis Arcangelo. Um olhar sobre os deslocamentos urbanos em Piratininga (SP): Desafios para a mobilidade urbana sustentável. 2021. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, 2021.

SILVA, Vinicius Luis Arcangelo; SÍGOLO, Letícia Moreira. Desafios para a mobilidade urbana sustentável em cidades pequenas: estudo em Piratininga/SP. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, v. 13, n. 114, 2025.

SOUTHWORTH, Michael. Designing the walkable city. Journal of Urban Planning and Development, v. 131, n. 4, p. 246-257, 2005.

VAN DE COEVERING, Pieter; SCHWANEN, Tim. Re-evaluating the impact of urban form on travel patterns in Europe: the role of spatial context. Journal of Transport and Land Use, [S. l.], v. 1, n. 2, p. 87-105, 2008.

VASCONCELLOS, E. A. Transporte urbano, espaço e equidade: análise das políticas públicas. São Paulo: Annablume, 2001.

VASCONCELLOS, Eduardo Alcântara de. Mobilidade urbana e cidadania. Rio de Janeiro: Senac, 2014.

YIN, Robert K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA RUMO A CIDADES SUSTENTÁVEIS: ESTUDO DE CASO DO OESTE PARANAENSE

1 Adriano Silva Garcia Blanco, 2 Barbarah Bueno Fonseca, 3 Clebes Iolanda Leodice Alves, 4 Giovanna Bellina Spadachin, 5 Elias Lira dos Santos Junior, 6 Evandro André Konopatzki

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail:adrianosgb2002@gmail.com , 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail:fonsecabarbarah@gmail.com ; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: posgradclebes@gmail.com, 4 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail:giovannabellina@alunos.utfpr.edu.br; 5 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: eliasjunior@utfpr.edu.br; 6 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: eakonopatzki@utfpr.edu.br

Palavras-chave: Transição energética; Transporte público; Sustentabilidade

Resumo

O presente trabalho aborda a transição energética no transporte público como estratégia para a promoção de cidades mais sustentáveis, com foco na substituição da frota municipal de ônibus a diesel, na região Oeste do Paraná, por veículos movidos a etanol ou eletricidade, visando à redução das emissões de CO_2. O objetivo principal consiste em avaliar os impactos ambientais e a viabilidade econômica dessa substituição. A metodologia adotada inclui o levantamento da frota de transporte coletivo dos municípios, a estimativa das emissões de CO_2, a análise da cobertura vegetal e do potencial de sequestro de carbono, bem como a realização do balanço de carbono. Adicionalmente, foram analisados os custos de implementação das tecnologias e o Potencial Municipal de Investimento. Os resultados indicam que a substituição por ônibus a etanol apresenta maior viabilidade econômica no curto prazo, devido ao menor custo inicial e à infraestrutura já consolidada no Brasil. Por outro lado, a eletrificação da frota, embora mais eficiente na redução das emissões, enfrenta limitações financeiras significativas, especialmente em municípios com menor capacidade de investimento. A análise do sequestro de carbono demonstrou que a vegetação local pode contribuir parcialmente para a compensação das emissões, sendo necessária a integração entre redução de emissões e ampliação da cobertura vegetal para alcançar maior equilíbrio ambiental. Conclui-se que a transição energética no transporte público deve ocorrer de forma gradual, sendo o etanol uma alternativa mais viável no curto prazo, enquanto a eletrificação depende de políticas públicas e incentivos para sua viabilização em larga escala.

Introdução

A crescente preocupação com a qualidade de vida da população e a sustentabilidade ambiental tem se intensificado nas últimas décadas, especialmente em áreas urbanas. Nesse contexto, o sistema de transporte público destaca-se como um dos principais responsáveis por impactos ambientais, devido à predominância do uso de combustíveis fósseis, que contribuem significativamente para a emissão de gases de efeito estufa e a degradação da qualidade do ar. Segundo Leurent e Windisch (2011), “a utilização intensiva de veículos automotores nas cidades está associada a diversos impactos negativos, incluindo emissões atmosféricas e consumo elevado de energia”. O modelo de mobilidade urbana vigente, fortemente baseado no transporte rodoviário, apresenta elevada dependência energética e está associado a diversos problemas ambientais e sociais, como poluição atmosférica, poluição sonora, congestionamentos e acidentes de trânsito. Conforme destaca Vasconcellos (2007), “o transporte urbano gera impactos negativos relevantes, tanto pelo uso de recursos naturais quanto pelos efeitos diretos sobre a qualidade de vida da população”. Nesse cenário, a transição energética surge como um processo essencial para a substituição gradual de fontes de energia convencionais por alternativas mais limpas e renováveis, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e a promoção do desenvolvimento sustentável. De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2023), a transição energética representa uma transformação estrutural da matriz energética, impulsionada pela necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa.

No Brasil, essa transição apresenta potencial significativo, considerando a elevada participação de fontes renováveis na matriz energética nacional. Conforme apontado pela ENGIE (2022), “o país possui uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo, com predominância de fontes renováveis na geração de energia”. Entre as alternativas disponíveis para o setor de transporte público, destacam-se o uso do etanol e a eletrificação da frota. O etanol, por ser um biocombustível renovável e amplamente produzido no país, apresenta vantagens relacionadas à redução de emissões e à viabilidade de implementação, devido à infraestrutura já existente. Segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2020), “o uso do etanol pode reduzir significativamente as emissões de poluentes locais e contribuir para a melhoria da qualidade do ar”. Por outro lado, os veículos elétricos demonstram maior eficiência energética e menor impacto ambiental, embora ainda enfrentem desafios relacionados aos custos de aquisição e à necessidade de adaptação da infraestrutura urbana. De acordo com o U.S. Department of Energy (2014), “os motores elétricos apresentam eficiência superior aos motores a combustão interna, convertendo uma parcela maior da energia em movimento”.

Diante desse contexto, torna-se fundamental avaliar alternativas que promovam a redução das emissões de dióxido de carbono no transporte público, considerando não apenas os aspectos ambientais, mas também os econômicos e estruturais. Assim, o presente trabalho tem como foco a análise da substituição da frota de transporte coletivo público municipal no Oeste do Paraná por veículos movidos a etanol e/ou eletricidade, visando contribuir para o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis e alinhadas às diretrizes globais de redução de emissões.

Material e Métodos

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem quantitativa e objetivo exploratório, visando avaliar cenários de transição energética no transporte coletivo público municipal da região Oeste do Paraná. A metodologia foi estruturada em etapas que envolvem coleta de dados, aplicação de equações matemáticas e análise comparativa de cenários. Inicialmente, foram considerados três cenários distintos: (i) cenário atual, com utilização de ônibus movidos a diesel; (ii) cenário intermediário, com substituição da frota por veículos movidos a etanol; e (iii) cenário ideal, com eletrificação total da frota. Os dados de população e área territorial dos municípios foram obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). As informações referentes à frota de transporte coletivo foram extraídas de bases de dados públicas associadas ao mesmo órgão. A pesquisa caracteriza-se como de natureza aplicada, com abordagem quantitativa e caráter exploratório, uma vez que busca analisar e comparar diferentes cenários a partir de dados reais e modelagens matemáticas. A área de estudo compreende 50 municípios da região Oeste do Paraná, sendo os dados de população (Pop) e área territorial (At) obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). As informações referentes ao tamanho da frota de transporte coletivo (Tf) foram extraídas de bases de dados públicas vinculadas ao mesmo órgão. Para a estimativa das emissões de dióxido de carbono (CO_2), foram consideradas as reações de combustão dos combustíveis diesel e etanol, conforme apresentado por Sun Earth Tools (2009), sendo, respectivamente, representada abaixo.

$$C12\ H23 + 71\ O2 \dashrightarrow 48\ CO2 + 46\ H2O + energia \quad (01)$$

$$C2\ H5\ OH + 3\ O2 \dashrightarrow 2\ CO2 + 3\ H2O + energia \quad (02)$$

Os fatores de emissão adotados foram de 2,6256 kg CO_2/L para o diesel e 1,506 kg CO_2/L para o etanol, enquanto as eficiências médias consideradas foram de 2,5 km/L e 1,8 km/L, respectivamente. A metodologia para o cálculo das emissões baseou-se na abordagem proposta por Álvares e Linke (2001), iniciando pela determinação da distância percorrida per capita da frota (Dpp), obtida a partir do produto entre o tempo de operação diário dos veículos e a velocidade média de deslocamento. Considerou-se um tempo de operação de 24 horas diárias, distribuídas em dois turnos de 12 horas, e velocidades médias de 20 km/h para ônibus a diesel e 22 km/h para ônibus a etanol conforme a equação descrita a seguir.

$$Dpp = Top \times Vm \quad (03)$$

Dpp = distância percorrida per capita (km/d);
Top = tempo de operação (h/d);
Vm = velocidade média (km/h).

Posteriormente, foi determinado o consumo per capita (Cpc), utilizando a eficiência dos combustíveis:

$$Cpc = Dpp \times Ef \quad (04)$$

Cpc = consumo per capto (l/d);
Dpp = distância percorrida per capita (km/d);
Ef = eficiência (km/l);

Em seguida foi feito o cálculo da emissão de CO2 da frota de ônibus, utilizando a seguinte expressão.

$$Emissão\ CO2 = Cpc \times Tf \times Fe\ (kg\ CO2/d) \quad (05)$$

Cpc = consumo per capto (l/d);
Tf = tamanho da frota (nº de ônibus);
Fe = fator de emissão (kg/l);

Os resultados obtidos em kg CO_2/dia foram posteriormente convertidos para toneladas anuais (tCO_2/ano), permitindo melhor análise em escala municipal. Para facilitar a interpretação, os dados foram representados por meio de mapas temáticos, utilizando escalas de cores, nas quais tons de azul indicam menores emissões e tons de vermelho indicam maiores emissões. A avaliação do potencial de sequestro de carbono foi realizada com base na cobertura vegetal dos municípios, utilizando técnicas de geoprocessamento que consideraram diferentes categorias de uso do solo, incluindo florestas nativas (Fn), plantios florestais (Pf), agricultura perene (Ap) e áreas de várzea (Var). Cada tipo de cobertura foi associado a uma taxa média de sequestro de carbono, sendo 12,5 tCO_2/ha/ano para florestas nativas, 20 tCO_2/ha/ano para plantios florestais, 5 tCO_2/ha/ano para agricultura perene e 8 tCO_2/ha/ano para várzeas, conforme ONTL *et al.* (2019). O sequestro total de carbono foi obtido pela soma das contribuições dessas diferentes coberturas. O balanço de carbono foi determinado pela diferença entre as emissões de CO_2 e o sequestro total de carbono, conforme apresentado a seguir.

Balanço (tCO2/ano) = Emissão CO2 - Sequestro Total

(06)

Valores negativos indicam uma situação ambiental favorável, na qual o sequestro supera as emissões, enquanto valores positivos indicam que o município emite mais CO 2 do que é capaz de absorver. Essa análise foi aplicada aos cenários com diesel e etanol, permitindo avaliar a eficiência ambiental da substituição da matriz energética. No cenário de substituição por etanol, foi considerado um custo médio de R$500.000,00 por ônibus, enquanto, no cenário de eletrificação da frota, foi adotado o valor de R$2.350.000,00 por veículo. O custo total de implementação foi calculado com base no tamanho da frota municipal, conforme as equações 7 e 8.

Custo Total (CT 2)= valor do ônibus etanol x Tf

(07)

Valor do ônibus etanol = 500.000 mil (Agência FAPESP, 2007);
Tf = tamanho da frota;

Custo Total (CT 3)= valor do ônibus elétrico x Tf

(08)

Valor do ônibus elétrico = 2.350.000 milhões (Estadão, 2023);
Tf = tamanho da frota.

Foi feito um levantamento das receitas orçamentárias de cada município em 2022. Para calcular o custo anual de um ônibus elétrico ou a etanol, consideramos que a vida útil média de um ônibus é de 10 anos, utilizando a seguinte equação.

$$Custo\ Anual\ =\ Implementação \div 10$$

(09)

Para calcular a capacidade de investimento em etanol e elétrico, utilizamos a seguinte equação.

$$Capacidade\ de\ investimento\ =\ Custo\ Anual\ \div\ Receita\ Orçamentária$$

(10)

Em seguida, consultou-se os Cadernos municipais do IPARDES (Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social) para encontrar os dados de investimento distribuídos para cada município do Oeste do Paraná em 2022. Assim, determinamos o valor total do investimento de cada município por meio da seguinte equação.

$$Investimento\ Total\ =\ Investimento\ 2022\ \div\ Receita\ Orçamentária$$

(11)

Para consolidar os procedimentos metodológicos adotados, ressalta-se que a integração entre a modelagem das emissões de CO_2, a estimativa do potencial de sequestro de carbono e a análise da viabilidade econômica permitiu a construção de um diagnóstico abrangente dos impactos associados aos diferentes cenários de transição energética no transporte coletivo municipal. A partir da aplicação das equações propostas e da organização dos dados em representações cartográficas e gráficas, foi possível estruturar uma base consistente para a interpretação dos resultados.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos evidenciam diferenças significativas entre os cenários analisados, tanto em termos ambientais quanto econômicos, permitindo uma avaliação integrada da viabilidade da transição energética no transporte público municipal do oeste do Paraná. No cenário baseado no diesel, a capacidade de sequestro de carbono não é suficiente para neutralizar as emissões geradas, resultando em um desequilíbrio ambiental mais acentuado (Figura 1). As emissões mais elevadas associadas ao uso de diesel ultrapassam significativamente a capacidade de absorção de CO_2 pela vegetação local, reforçando os impactos negativos desse combustível fóssil. Além disso, ao relacionar as emissões com a cobertura vegetal, observa-se que, embora os municípios com maior presença de áreas florestais apresentem maior capacidade de absorção de CO_2, essa ainda não é suficiente para compensar o volume emitido nesse cenário.

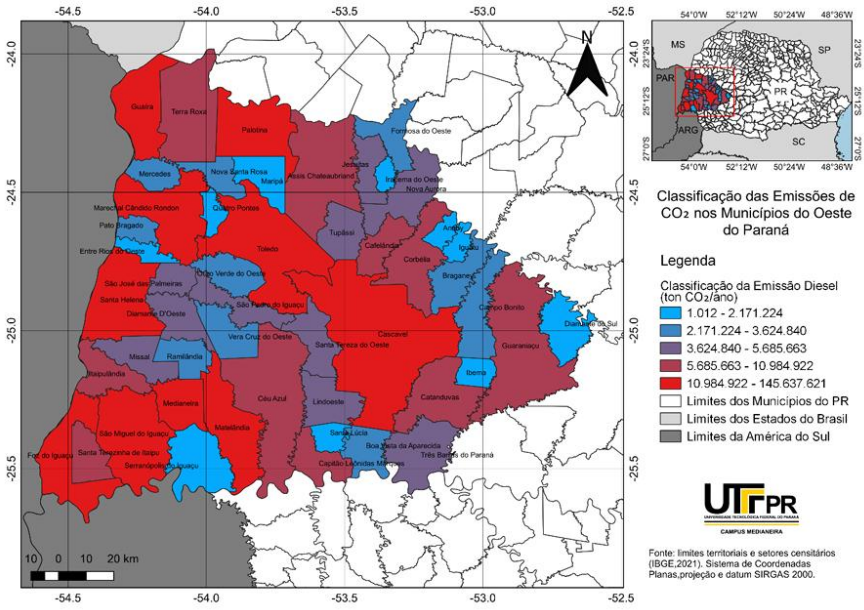


Figura 01 - Emissão de CO_2 da frota a diesel
Fonte: Fonseca (2024)

Em contrapartida, a substituição do diesel por etanol resultou em uma redução expressiva nas emissões de CO_2, evidenciando o potencial desse biocombustível como alternativa mais sustentável no contexto brasileiro (Figura 2). Essa diminuição está diretamente relacionada ao menor fator de emissão do etanol em comparação ao diesel, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais associados ao transporte público. Nesse cenário, a redução das emissões favorece um maior equilíbrio entre emissão e sequestro de carbono, especialmente em municípios com maior cobertura vegetal, que atuam como importantes sumidouros de carbono. Dessa forma, a comparação entre os cenários reforça que a adoção de combustíveis mais limpos, como o etanol, é essencial para alcançar um sistema de transporte público ambientalmente mais equilibrado e sustentável.

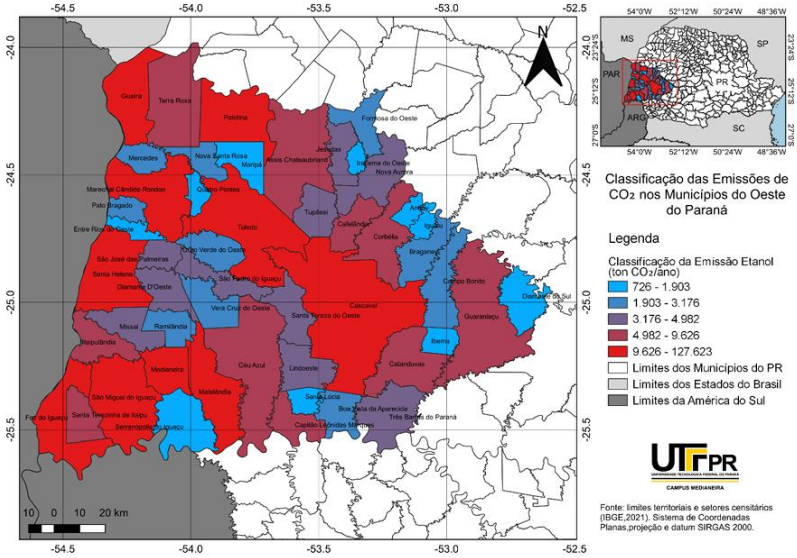


Figura 02 - Emissão de CO_2 da frota municipal a Etanol a diesel
Fonte: Fonseca (2024)

A avaliação do balanço de carbono reforça essa análise. No cenário com diesel, a maioria dos municípios apresenta saldo positivo de CO_2, indicando que as emissões superam a capacidade de sequestro, o que caracteriza um sistema ambientalmente insustentável. Esse resultado evidencia um desequilíbrio entre a geração de emissões e a capacidade natural de compensação ambiental, contribuindo para o acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera. Mesmo em municípios com maior cobertura vegetal, a intensidade das emissões provenientes da frota a diesel é suficiente para ultrapassar a capacidade de absorção de CO_2, demonstrando que a vegetação, embora relevante, não é capaz de neutralizar os impactos desse modelo de transporte. Esse cenário reforça a necessidade de adoção de alternativas energéticas mais limpas, associadas a estratégias complementares de mitigação ambiental.

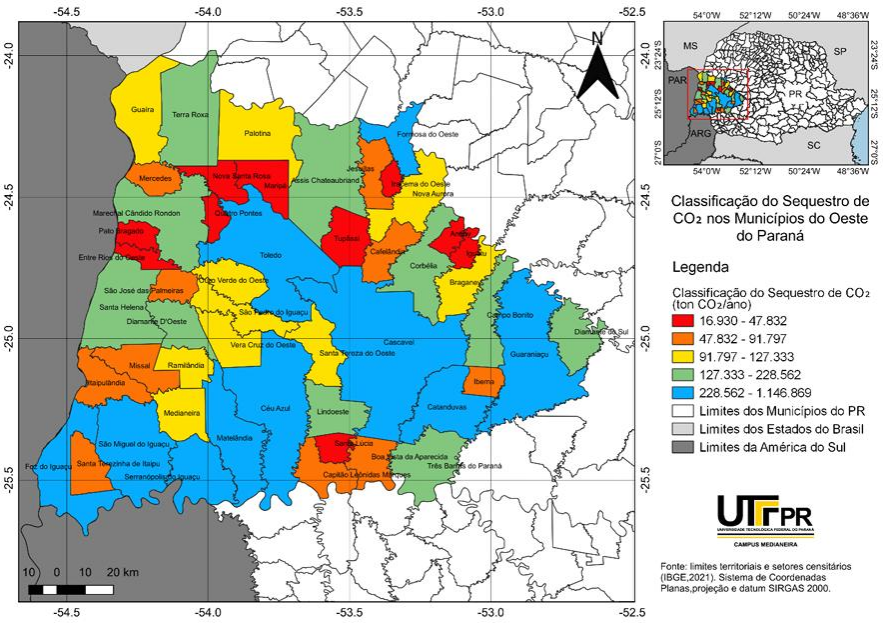


Figura 03 Sequestro municipal de CO_2.
Fonte: Fonseca (2024)

No cenário com diesel, a maioria dos municípios apresenta saldo positivo de CO_2, evidenciando que as emissões superam a capacidade de sequestro e caracterizando um sistema ambientalmente insustentável (Figura 4). De forma quantitativa, observa-se que o balanço total de CO_2 a diesel atinge 633.836.085,78 tCO_2/ano, demonstrando a elevada contribuição desse combustível para o aumento das emissões regionais. Entre os municípios analisados, Anahy apresenta o menor valor, com 23.777 tCO_2/ano (-0,0038%), enquanto Foz do Iguaçu se destaca como o maior emissor, com 145.376.570 tCO_2/ano (22,94%). Vale ressaltar que valores negativos representam um resultado ambientalmente favorável, indicando maior sequestro de carbono em relação às emissões. No entanto, observa-se que apenas um município apresenta esse comportamento, reforçando que, no cenário com diesel, a maior parte da região não consegue compensar suas emissões por meio dos sumidouros naturais. Esse panorama evidencia que, mesmo em áreas com cobertura vegetal relevante, o uso intensivo de combustíveis fósseis compromete o equilíbrio ambiental, exigindo intervenções mais efetivas para mitigação dos impactos.

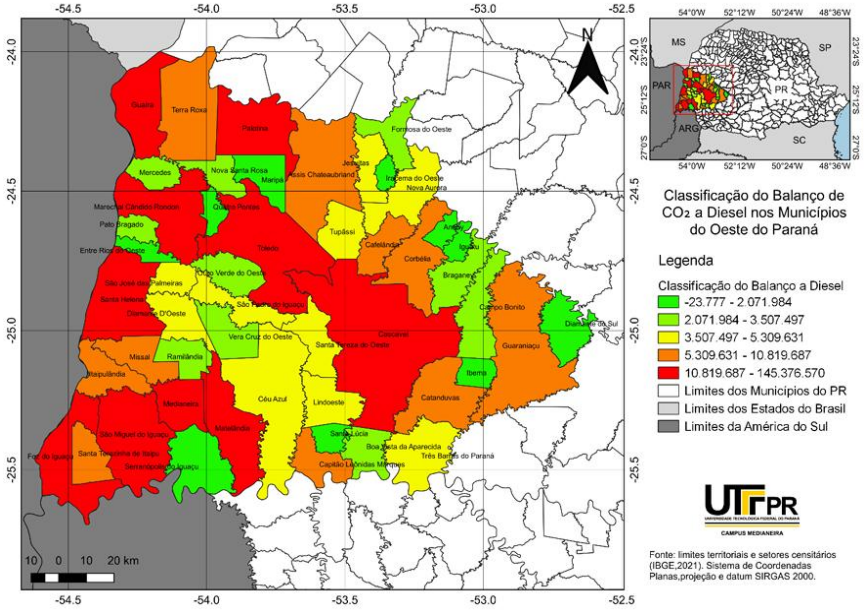


Figura 04 - Balanço de CO_2 a diesel
Fonte: Fonseca (2024)

Por outro lado, no cenário com etanol, observa-se uma inversão deste comportamento, com todos os municípios apresentando balanço negativo de CO_2, indicando que o sequestro de carbono é superior às emissões geradas (Figura 5). De forma quantitativa, o balanço total de CO_2 a etanol é de -7.768.450,95 tCO_2/ano, evidenciando um cenário ambientalmente

favorável em toda a região. Entre os municípios analisados, Céu Azul apresenta o maior destaque em termos de sequestro, com -1.141.790,06 tCO_2/ano (14,70%), enquanto Iracema do Oeste registra o menor valor absoluto, com 16.204,30 tCO_2/ano (0,21%). Esses resultados indicam que, conforme os valores negativos predominantes, todos os municípios apresentam um sequestro de carbono superior às suas emissões. Dessa forma, esse cenário demonstra de maneira clara o potencial do etanol na promoção do equilíbrio ambiental, reduzindo significativamente as emissões e permitindo que a capacidade de absorção dos ecossistemas locais seja suficiente para compensar os impactos gerados pelo transporte público.

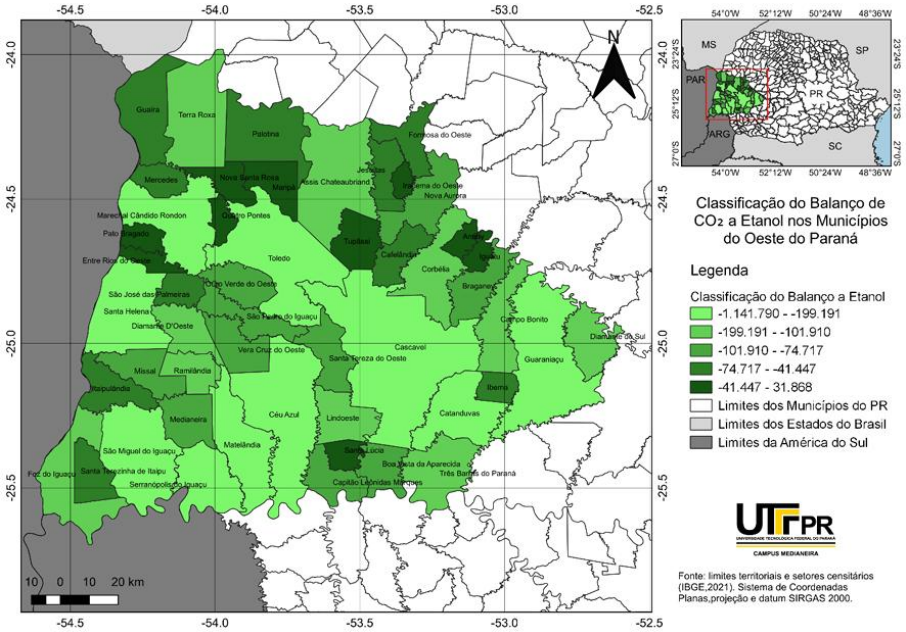


Figura 05 - Balanço de CO_2 a Etanol
Fonte: Fonseca (2024)

A análise dos custos de implementação evidencia que a substituição por ônibus a etanol apresenta maior viabilidade econômica, sobretudo em função do menor investimento inicial requerido, o que facilita sua adoção por municípios com restrições orçamentárias. Em contrapartida, a eletrificação da frota, embora elimine as emissões diretas de CO_2, apresenta custos significativamente mais elevados, além de demandar infraestrutura específica, como sistemas de recarga, adequações na rede elétrica e adaptações operacionais, o que dificulta sua implementação em larga escala no curto prazo. A Figura 6 apresenta o mapa dos custos de investimentos iniciais para a aquisição da frota de ônibus movidos a etanol na região oeste do Paraná, permitindo uma análise espacial da distribuição desses investimentos.

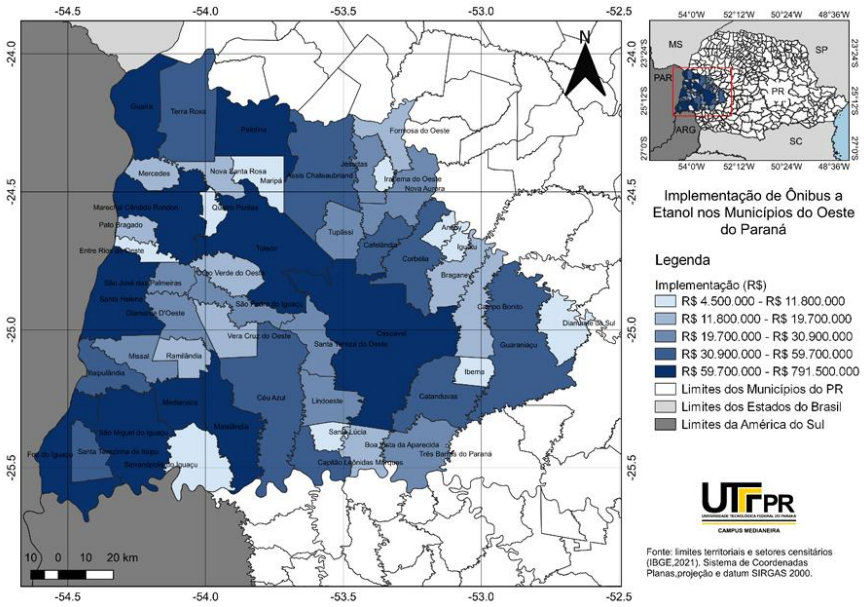


Figura 06 - Implementação de ônibus a Etanol
Fonte: Fonseca (2024)

De forma quantitativa, observa-se que os municípios apresentaram um custo inicial total de implementação de R$ 3.495.500.000,00 (três bilhões, quatrocentos e noventa e cinco milhões e quinhentos mil reais). Entre os municípios analisados, Iracema do Oeste e Quatro Pontes apresentam os menores valores de investimento, com R$ 4.500.000,00 (0,13%) cada, enquanto Foz do Iguaçu se destaca com o maior custo inicial, atingindo R$ 791.500.000,00 (22,88%). Essa variação está diretamente associada ao porte populacional, à demanda por transporte coletivo e à dimensão da frota necessária em cada município. Assim, os resultados reforçam que, apesar do elevado montante global de investimento, o cenário com etanol apresenta maior viabilidade relativa quando comparado à eletrificação, especialmente em contextos municipais com limitações financeiras e estruturais. A Figura 7 ilustra a distribuição espacial dos custos de investimentos iniciais necessários para a implementação da frota de ônibus elétricos na região oeste do Paraná. Essa representação permite analisar, de forma integrada, a magnitude dos recursos financeiros e as variações entre os municípios, evidenciando as diferenças associadas ao porte populacional, à demanda por transporte coletivo e à dimensão das frotas. Além disso, a figura contribui para a compreensão dos desafios econômicos envolvidos na eletrificação do transporte público, destacando a necessidade de planejamento estratégico e de políticas de incentivo para viabilizar a adoção dessa tecnologia em escala regional.

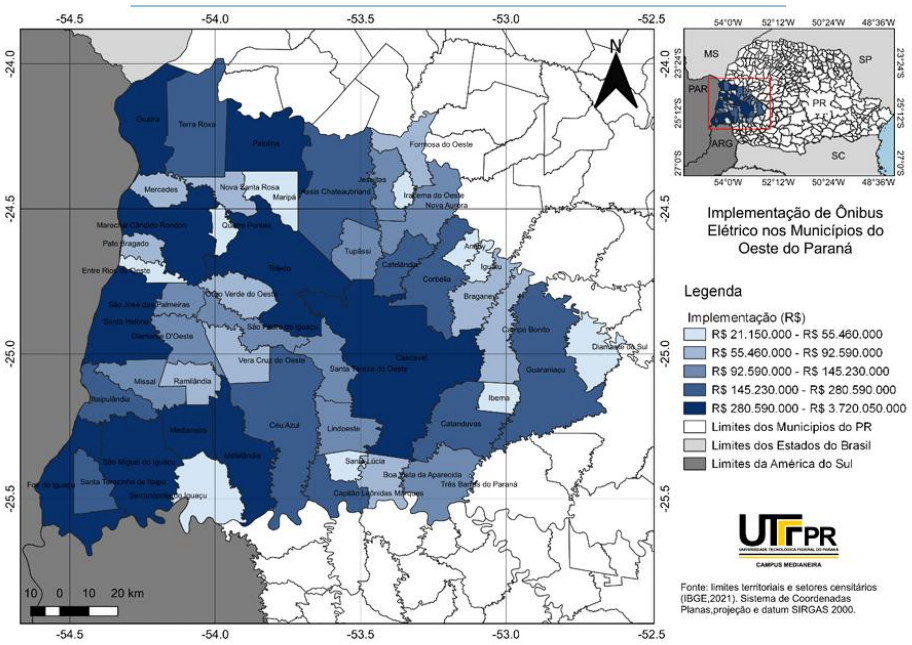


Figura 07 - Implementação de ônibus Elétricos.
Fonte: Fonseca (2024)

De maneira quantitativa, os municípios apresentaram um custo total de implementação de R$16.428.850.000,00 (dezesseis bilhões, quatrocentos e vinte e oito milhões, oitocentos e cinquenta mil reais). Entre os municípios analisados, Iracema do Oeste e Quatro Pontes registram os menores custos, na ordem de R$21.150.000,00 (0,13%) cada, enquanto Foz do Iguaçu apresenta o maior investimento, com R$3.720.050.000,00 (22,64%). Essa variação está diretamente relacionada à escala da demanda por transporte público, ao tamanho da frota necessária e à complexidade operacional de cada município. Além disso, é importante destacar que esses valores não se limitam apenas à aquisição dos veículos, mas também refletem, de forma indireta, a necessidade de investimentos complementares em infraestrutura de recarga, sistemas de armazenamento de energia e possíveis adaptações na rede elétrica. Dessa forma, embora a eletrificação represente a alternativa mais eficiente do ponto de vista ambiental, os elevados custos iniciais constituem um dos principais entraves à sua adoção em larga escala no curto prazo, especialmente em municípios com menor capacidade de investimento. A análise desta pesquisa revela uma relação diretamente proporcional entre o tamanho da frota de ônibus e os custos associados, de modo que municípios com maior número de veículos demandam investimentos mais elevados. Considerando a hipótese de custo unitário constante por veículo, foi possível realizar uma comparação mais simplificada e objetiva dos custos totais entre diferentes municípios, permitindo identificar padrões de investimento e a escalabilidade do sistema de transporte coletivo. Nesse contexto, visando avaliar a viabilidade econômica da transição energética, foi realizada uma análise do Potencial Municipal de Investimento (PMI), entendido como a relação entre a dotação orçamentária destinada a investimentos e a receita total anual de cada município. A Figura 8 apresenta o potencial municipal de investimento, evidenciando a proporção da dotação orçamentária destinada a investimentos em relação à receita total anual de cada município. Esse indicador permite mensurar a capacidade financeira das administrações municipais para absorver os custos iniciais associados à substituição da frota, sendo fundamental para a avaliação da viabilidade da implantação das alternativas energéticas propostas. A partir dessa análise, é possível identificar diferenças significativas entre os municípios, destacando aqueles com maior capacidade de investimento e aqueles que demandam apoio financeiro adicional, seja por meio de políticas públicas, incentivos governamentais ou mecanismos de financiamento. Dessa forma, o PMI se configura como um instrumento essencial para subsidiar o planejamento da transição energética, garantindo maior coerência entre os custos estimados e a realidade orçamentária dos municípios.

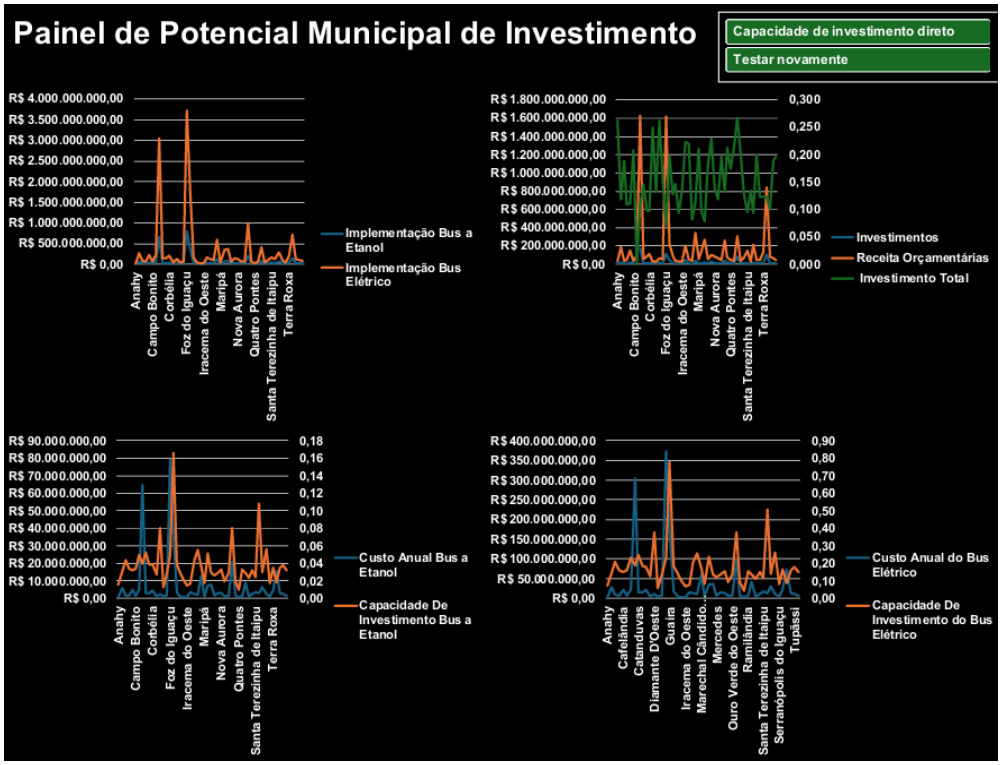


Figura 08 - Potencial municipal de investimento
Fonte: Fonseca (2024)

Nesta análise, investigou-se a viabilidade da adoção de ônibus movidos a etanol como alternativa energética para o transporte público municipal, à luz do potencial de investimento dos municípios avaliados. Os resultados indicam que essa alternativa apresenta maior acessibilidade económica em comparação à eletrificação da frota, especialmente em contextos caracterizados por restrições orçamentárias. O custo anualizado da frota de ônibus a etanol, considerando um ciclo de vida útil de 10 anos, foi estimado em R$349.550.000,00. Entre os municípios analisados, Iracema do Oeste e Quatro Pontes apresentaram os menores custos, com R$450.000,00 (0,13%) cada, ao passo que Foz do Iguaçu concentrou o maior dispêndio, totalizando R$79.150.000,00 (22,64%). Tais resultados evidenciam a influência direta do porte municipal e da dimensão da frota sobre os custos de implementação. No cenário de eletrificação, o custo anualizado foi significativamente superior, atingindo R$1.642.885.000,00, o que reforça as limitações econômicas associadas à adoção dessa tecnologia no curto prazo. De forma análoga, Iracema do Oeste e Quatro Pontes registraram os menores custos (R$2.115.000,00; 0,13%), enquanto Foz do Iguaçu apresentou o maior valor (R$372.005.000,00; 22,64%). A expressiva diferença entre os cenários analisados evidencia o elevado custo de capital requerido para a eletrificação, incluindo não apenas a aquisição dos veículos, mas também a necessidade de infraestrutura complementar e adaptações operacionais. No que concerne à capacidade orçamentária, a receita total dos municípios analisados foi de R$8.659.428.547,30, evidenciando significativa heterogeneidade entre as unidades municipais. Iguatu apresentou o menor orçamento, com R$25.863.245,70 (0,30%), enquanto Cascavel registrou o maior, totalizando R$1.629.700.483,00 (18,82%). Em relação aos investimentos realizados no ano de 2022, o montante total foi de R$ 1.073.649.947,13, sendo Iguatu o município com menor volume de investimento (R$ 2.422.297,62; 0,23%) e Cascavel o maior (R$ 176.876.602,86; 16,47%). Destaca-se, ainda, que Capitão Leônidas Marques não apresentou registros de investimentos no período analisado.

Diante desse contexto, verifica-se que a viabilidade de implementação das alternativas energéticas está intrinsecamente condicionada à capacidade fiscal dos municípios. Assim, o etanol configura-se como uma alternativa tecnicamente viável e economicamente compatível com a realidade orçamentária da maioria dos municípios no curto e médio prazo. Por outro lado, a eletrificação da frota, embora ambientalmente mais eficiente, demanda maior disponibilidade de recursos financeiros e suporte institucional, o que reforça a necessidade de políticas públicas, mecanismos de financiamento e incentivos governamentais para viabilizar sua adoção em larga escala. Ademais apresentamos a capacidade de investimento direto dos municípios para a adoção da frota de ônibus movidos a etanol (figura 9), considerando a relação entre os custos estimados de implementação e o potencial municipal de investimento. Essa análise permite avaliar, de forma objetiva, o grau de viabilidade financeira imediata de cada município para a substituição da frota, sem a necessidade de aportes externos. A partir dessa representação, torna-se possível identificar quais municípios possuem capacidade orçamentária suficiente para arcar com os custos da transição energética no curto prazo, bem como aqueles que demandam mecanismos complementares de financiamento. Dessa forma, a figura constitui um instrumento fundamental para a compreensão da distribuição espacial da viabilidade econômica, subsidiando a formulação de estratégias diferenciadas e mais realistas para a implementação do etanol como alternativa energética no transporte público regional.

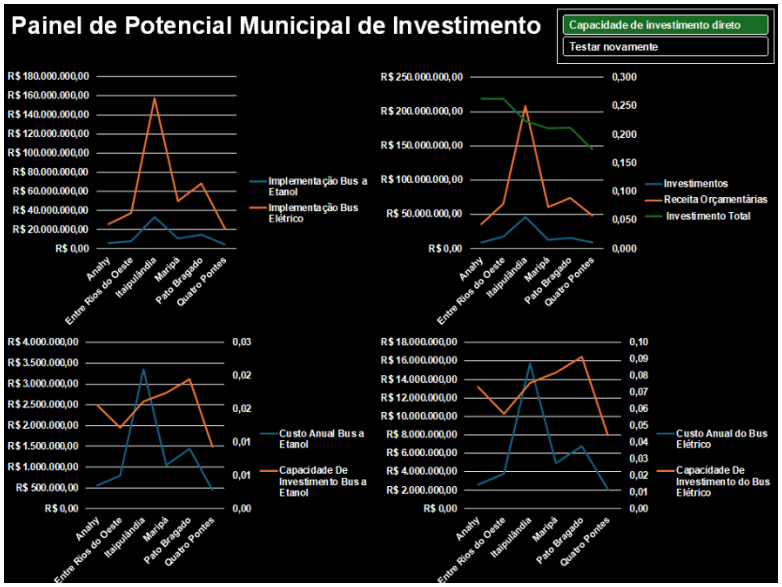


Figura 09 - Capacidade de Investimento direto para Etanol
Fonte: Fonseca (2024)

No dashboard de capacidade de investimento direto, identifica-se que seis municípios apresentam potencial para promover a renovação de suas frotas de ônibus movidos a etanol sem comprometer o equilíbrio de suas finanças públicas. São eles: Anahy (26,25%), Entre Rios do Oeste (26,27%), Itaipulândia (22,38%), Maripá (21,11%), Pato Bragado (21,21%) e Quatro Pontes (17,44%). Esses municípios destacam-se por apresentarem elevada proporção de recursos orçamentários destinados a investimentos em relação à receita total anual, o que lhes confere maior autonomia financeira para a implementação de projetos estruturais. Esse cenário evidencia que tais localidades possuem condições favoráveis para realizar a transição energética no transporte público de forma imediata, sem a necessidade de recorrer a mecanismos de endividamento ou fontes externas de financiamento. Assim, a análise reforça a importância do Potencial Municipal de Investimento (PMI) como indicador estratégico para a tomada de decisão, permitindo identificar municípios com maior capacidade de implementação e subsidiando o planejamento de políticas públicas mais eficientes e direcionadas. Considerando as limitações orçamentárias identificadas em parte dos municípios analisados, especialmente aqueles que não apresentam dotação específica para investimentos, torna-se necessária a adoção de abordagens alternativas para viabilizar a renovação da frota de transporte coletivo. Nesses casos, a ausência de recursos próprios compromete a capacidade de implementação direta de projetos de transição energética, exigindo a utilização de mecanismos complementares de financiamento, como transferências intergovernamentais, parcerias público-privadas e acesso a linhas de crédito específicas. Nesse contexto, a Figura 10 apresenta a simulação aplicada aos municípios que não contemplam, em sua dotação orçamentária, recursos destinados a investimentos, permitindo avaliar cenários de viabilidade a partir de diferentes estratégias de financiamento. Essa análise possibilita compreender o grau de dependência desses municípios em relação a fontes externas e reforça a importância da formulação de políticas públicas que promovam maior equidade na implementação de soluções sustentáveis no transporte público.

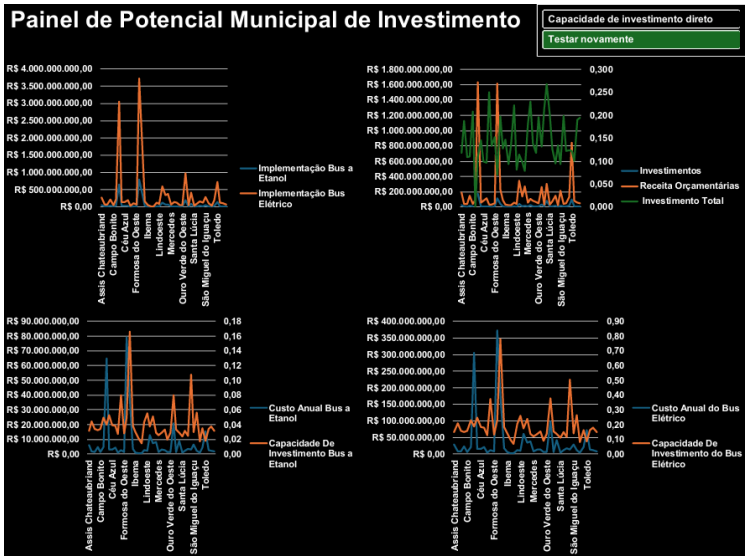


Figura 10 - Município sem verba de investimento
Fonte: Fonseca (2024)

Observa-se que parte dos municípios analisados não apresenta capacidade financeira suficiente para promover uma substituição integral e imediata de suas frotas de transporte coletivo. Ainda que alguns desses municípios possuam receitas totais elevadas e volumes expressivos de investimentos, tais recursos não se mostram suficientes para viabilizar uma substituição direta completa da frota, permitindo, em termos práticos, uma renovação parcial de até aproximadamente 50%. Esse cenário evidencia que a viabilidade da transição energética está diretamente condicionada à capacidade fiscal individual de cada município, bem como à forma como os recursos orçamentários estão distribuídos entre diferentes demandas administrativas. Adicionalmente, a implementação de ônibus elétricos apresenta desafios ainda mais significativos, especialmente em municípios com restrições orçamentárias e limitada capacidade de investimento. Mesmo ao considerar cenários de substituição parcial, como a renovação de 50% da frota, os resultados indicam limitações relevantes, decorrentes do elevado custo de aquisição dos veículos elétricos e da necessidade de investimentos complementares em infraestrutura, incluindo sistemas de recarga e adaptações na rede elétrica. Esses fatores reduzem a atratividade econômica dessa alternativa no curto prazo, reforçando a necessidade de planejamento escalonado e de mecanismos de apoio financeiro para viabilizar sua adoção em contextos municipais mais restritivos.

Considerações Finais

Como considerações finais, o presente estudo evidenciou que a substituição da frota de transporte coletivo no oeste do Paraná por veículos movidos a etanol e eletricidade representa uma estratégia promissora para a mitigação das emissões de CO_2, ainda que condicionada a diferentes níveis de viabilidade técnico-econômica. Os resultados obtidos confirmam que o cenário atual, baseado no diesel, apresenta desempenho ambiental insatisfatório, uma vez que as emissões geradas superam a capacidade de sequestro de carbono dos municípios analisados, comprometendo o equilíbrio do balanço de carbono regional. Em contrapartida, a adoção do etanol demonstrou elevada eficiência na redução das emissões, aliada a uma maior viabilidade econômica, o que o posiciona como uma alternativa estratégica para implementação no curto e médio prazo, especialmente no contexto brasileiro, onde sua cadeia produtiva já se encontra consolidada. Por outro lado, embora a eletrificação da frota apresenta maior potencial de descarbonização e eficiência energética, sua aplicação em larga escala ainda é limitada por fatores como o alto custo inicial dos veículos, a necessidade de investimentos em infraestrutura de recarga e as exigências de adaptação dos sistemas urbanos. Dessa forma, a transição energética no setor de transporte público deve ser conduzida de maneira progressiva e planejada, respeitando as particularidades socioeconômicas e estruturais dos municípios. Nesse contexto, o etanol se configura como uma solução intermediária viável, enquanto a eletrificação deve ser incorporada gradualmente como uma alternativa de longo prazo. Por fim, destaca-se que a efetividade das estratégias de mitigação não depende exclusivamente da substituição de combustíveis, mas também da integração com políticas ambientais complementares, como a conservação e ampliação da cobertura vegetal, que desempenham papel fundamental no sequestro de carbono. Assim, a adoção de abordagens integradas envolvendo mobilidade sustentável, uso de fontes renováveis e gestão territorial é essencial para promover sistemas urbanos mais resilientes e ambientalmente equilibrados. Em síntese, conclui-se que a transição energética no oeste do Paraná deve ser orientada por critérios técnicos, econômicos e ambientais, de forma a garantir não apenas a redução das emissões, mas também a sustentabilidade a longo prazo do sistema de transporte público.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelo suporte institucional e pela infraestrutura proporcionada. Expressamos nossa especial gratidão ao Professor Dr. Elias Lira dos Santos Júnior, cuja orientação, dedicação e valiosas contribuições foram fundamentais para o amadurecimento e a realização deste trabalho. Por fim, estendemos nossos agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a concretização deste projeto

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 37120: cidades e comunidades sustentáveis – indicadores de serviços municipais e qualidade de vida**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: https://www.gedweb.com.br/. Acesso em: 06 abr 2026.

ÁLVARES JR., O. M.; LINKE, R. R. A. **Metodologia simplificada de cálculo das emissões de gases de efeito estufa de frotas de veículos no Brasil**. São Paulo: CETESB, 2001.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997**. Disponível em:https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=237. Acesso em: 02 abr 2026.

NUNES *et al*. **Um olhar sobre transporte rodoviário e a sustentabilidade: o impacto da poluição no meio ambiente**. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 16, 2019. Anais [...]. Disponível em: https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos19/23728204.pdf . Acesso em: 02 abr 2026.

CENEVIVA, L. L. V.; MORATO, A. **Legislação e licenciamento ambiental e o setor de transportes**. Série Cadernos Técnicos, v. 6, p. 120–133, jul. 2007.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Informativo técnico n. 011/2022: apresentação da metodologia e dos fatores de emissão utilizados para as estimativas de emissão de GEE**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/areas-de-atuacao/estudos-socioambientais/SiteAssets/Paginas/Emissoes-de-Gases-de-Efeito-Estufa/Informativo%20Tecnico_11_2022_fatores%20de%20emiss%C3%A3oSMA.pdf . Acesso em: 07 abr 2026.

ENGIE. **Transição energética: conceito vai muito além da energia**. Disponível em: https://www.alemdaenergia.engie.com.br/transicao-energetica-muito-alem-da-energia/. Acesso em: 08 abr 2026.

FONSECA, B. B. **Transição energética rumo a cidades sustentáveis: estudo de caso do Oeste Paranaense**. 2024. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2024. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/35150/1/transicaoenergeticacidadesustentaveis.pdf. Acesso em 07 abr 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades e estados do Brasil**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/. Acesso em 09 abr 2026.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Revista Tempo do Mundo: segurança, integração e transição energética justa**, n. 32, 2023. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/revistas/index.php/rtm/issue/view/32/37. Acesso em 07 abr 2026.

LEURENT, F.; WINDISCH, E. **Triggering the development of electric mobility: a review of public policies**. *European Transport Research Review*, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257787581. Acesso em 07 abr 2026.

ONTL, T. A. *et al*. **Forest management for carbon sequestration and climate adaptation**. *Journal of Forestry*, v. 118, n. 1, p. 86–101, 2019. Disponível em: https://academic.oup.com/jof/article/118/1/86/5648951.

SUN EARTH TOOLS. **CO_2 emissions calculator**. 2009. Disponível em: https://www.sunearthtools.com/pt/tools/CO2-emissions-calculator.php.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA (UNICA). Uso do etanol evitou a emissão de 535 milhões de toneladas de CO2. 2020. Disponível em: https://unica.com.br/noticias/uso-do-etanol-evitou-a-emissao-de-535-milhoes-de-toneladas-de-co2eq-em-16-anos/. Acesso em 08 abr 2026.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **All-electric vehicles (EVs)**. 2014. Disponível em: https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml. Acesso em 05 abr 2026.

VASCONCELLOS, E. A. **Transporte e meio ambiente**. Série Cadernos Técnicos, v. 6, p. 10–25, jul. 2007.

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA EMBARCADO DE AQUISIÇÃO DE DADOS (DATA LOGGER) PARA ANÁLISE CINEMÁTICA EM MICROMOBILIDADE

1 Thiago de Almeida Baziotti, 2 Daniel Juliano Pamplona da Silva
1 Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), e-mail:thiago.baziotti@sou.unifal-mg.edu.br; 2 Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), e-mail:daniel.silva@unifal-mg.edu.br

Palavras-chave: *Data logger*; Arduino; Micromobilidade

Resumo

A mitigação das mudanças climáticas exige a redução das emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes, tornando a avaliação de veículos elétricos essencial para o desenvolvimento urbano sustentável. Para quantificar com precisão a eficiência energética e a redução de impactos ambientais na micromobilidade, o presente estudo tem como objetivo realizar a validação de operacionalidade de um sistema de aquisição de dados (*data logger*) de baixo custo em ambiente de bancada, visando sua futura aplicação em um triciclo elétrico leve. O equipamento foi desenvolvido com um microcontrolador Arduino Mega, integrado a um sensor de efeito Hall para detecção da rotação de uma roda, com registros temporais via módulo RTC e armazenamento em cartão SD. O protocolo experimental submeteu o sistema a quatro níveis de excitação do motor via Modulação por Largura de Pulso (PWM). Para assegurar a reprodutibilidade dos dados estruturados, o processamento foi semiautomatizado através do Microsoft Power Query. Os resultados comprovaram funcionamento adequado do sistema, apresentando baixa dispersão nos valores de velocidade, alta repetitividade entre os ensaios e consistência na geração de arquivos. Conclui-se que o sistema demonstrou robustez no fluxo de aquisição e tratamento, consolidando-se como uma ferramenta tecnológica acessível para monitorar o desempenho energético e subsidiar métricas de sustentabilidade em condições reais de operação.

Introdução

As alterações climáticas estão diretamente associadas ao aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa, impulsionado majoritariamente pela queima de combustíveis fósseis e por atividades antrópicas (Filonchyk et al., 2024). Nesse contexto, o setor de transportes ocupa posição de destaque, com emissões de CO_2 que atingiram 8,25 bilhões de toneladas em 2019, representando um aumento significativo em relação às décadas anteriores (Dai et al., 2023). Além das emissões de gases de efeito estufa, o transporte rodoviário também contribui significativamente para a poluição atmosférica, afetando a qualidade do ar e gerando impactos ambientais e à saúde humana (Mbandi et al., 2023). Diante desse cenário, os veículos elétricos têm sido apontados como uma alternativa para a redução das emissões no setor de transportes, especialmente no âmbito da transição energética.

Sob uma ótica ambiental, a efetividade dessa transição energética e a efetiva mitigação da pegada de carbono promovida pela micromobilidade elétrica dependem da comprovação prática de sua eficiência. Para quantificar com precisão os impactos ambientais evitados e subsidiar estratégias de desenvolvimento urbano sustentável, é imprescindível monitorar o consumo e o desempenho desses veículos.

Dessa forma, a avaliação do desempenho energético de veículos elétricos requer a aquisição de dados operacionais ao longo de sua operação. Historicamente, a obtenção rigorosa de variáveis cinemáticas e de desempenho estabeleceu-se por meio de sistemas de telemetria em competições de protótipos estudantis e de alto rendimento, como a Fórmula SAE, onde a análise de dados mecânicos e operacionais é vital para a otimização veicular (Muniyandy et al., 2023). Essa base tecnológica tem inspirado a necesidade de monitoramento contínuo também em modais urbanos de baixo impacto.

Apesar dos avanços já observados, ainda existem limitações na obtenção de dados operacionais em condições reais de uso, o que dificulta análises mais detalhadas sobre o desempenho energético de sistemas de mobilidade. Para superar a barreira do alto custo dos equipamentos industriais de telemetria e fundamentar a pesquisa em sustentabilidade, os Sistemas de Aquisição de Dados (DAS – *Data Acquisition Systems*) baseados em plataformas de código aberto, como o microcontrolador Arduino Mega, têm emergido como soluções acessíveis e consistentes para o registro de variáveis físicas em aplicações experimentais (Ramdeane, 2020).

Adicionalmente, a coleta contínua de variáveis cinemáticas gera um volume massivo de registros estruturados. A confiabilidade da avaliação veicular não depende apenas da aquisição via *data logger*, mas também da capacidade de procesar esses dados de forma reprodutível. A utilização de rotinas para Extrair, Transformar e Carregar (ETL) com ferramentas consolidadas, como Microsoft Power Query, permite a padronização e a consolidação de grandes conjuntos de dados, minimizando erros manuais e facilitando a análise (Raviv, 2018).

O presente estudo tem como objetivo realizar uma validação de operacionalidade de um *data logger*, por meio da coleta de dados cinemáticos sob diferentes regimes de condução, em ambiente de bancada, visando sua aplicação futura em um triciclo elétrico leve.

Material e Métodos

O sistema experimental proposto neste estudo consiste em uma bancada composta por uma roda tracionada por um motor de corrente contínua (DC) de 9V, com um imã de neodímio fixado em um ponto de seu perímetro, e uma ponte H L298N. O equipamento, representado pela Figura 1, é baseado em um microcontrolador Arduino Uno, responsável pelo processamento dos comandos. O objetivo é simular uma roda aro 29, equivalente a 0,717 m de diâmetro.

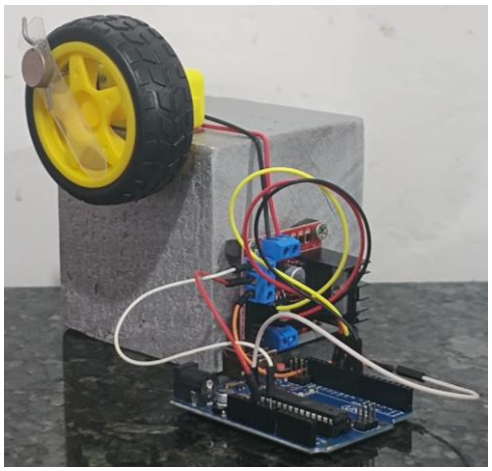


Figura 01: Sistema experimental de roda motorizada.
Fonte: autores (2026)

O conjunto foi concebido com o objetivo de simular, de forma simplificada e em ambiente controlado, condições operacionais associadas ao movimento rotacional da roda dianteira de um triciclo elétrico leve, possibilitando a validação inicial do sistema de aquisição de dados em termos de detecção de eventos, registro temporal e armazenamento de informações. A utilização de uma bancada experimental permite maior controle das variáveis de operação, contribuindo para a verificação das variáveis do sistema antes de sua aplicação em condições reais.

No que diz respeito ao sistema de aquisição de dados, *o data logger* desenvolvido neste trabalho é baseado em uma plataforma embarcada utilizando um microcontrolador Arduino Mega, selecionado em função de sua capacidade de processamento, número de portas de entrada e saída disponíveis e compatibilidade com diferentes sensores e módulos de comunicação (Ramdeane, 2020). O equipamento foi projetado para realizar o monitoramento de variáveis cinemáticas durante a operação do veículo, com foco na aquisição de dados relativos ao deslocamento, velocidade e tempo de operação, conforme ilustrado na Figura 2.

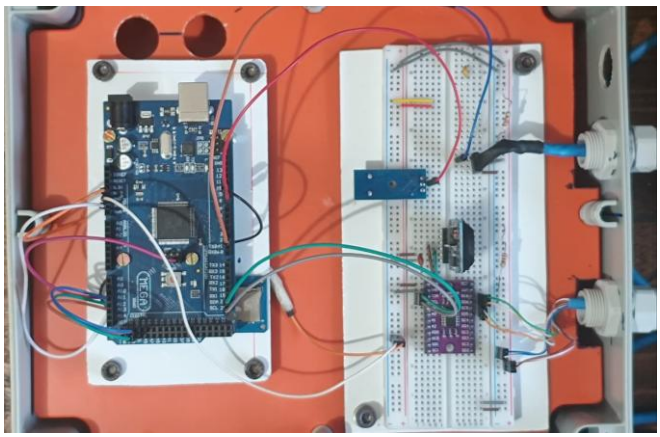


Figura 02: Sistema de aquisição de dados (*data logger*).
Fonte: autores (2025)

A arquitetura do sistema foi concebida de forma modular, permitindo a futura integração de novos sensores e variáveis, conforme a evolução das etapas experimentais do estudo. Conforme ilustrado na Figura 3, o *data logger* foi encapsulado em uma caixa plástica com vedação, com organização interna projetada para facilitar manutenção e substituição de componentes. Os displays foram igualmente acondicionados em invólucro transparente, visando prevenção contra respingos e poeira. O cabeamento externo foi feito utilizando cabos multipolares, promovendo maior resistência mecânica e organização das conexões. Essa configuração construtiva foi adotada com o objetivo de garantir robustez para uso em campo.

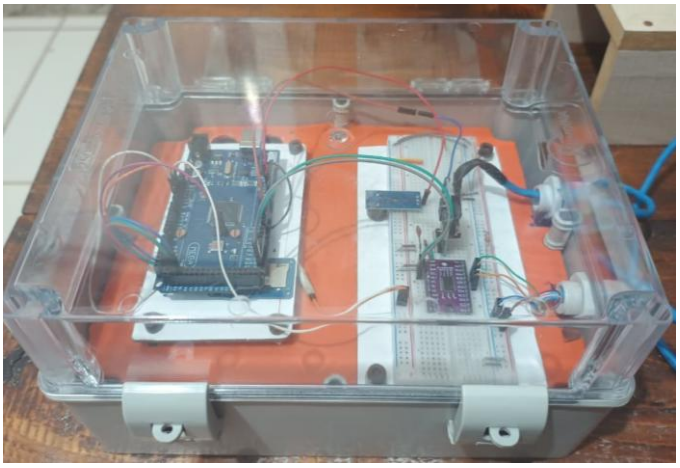


Figura 03: Encapsulamento do *data logger*.
Fonte: autores (2025)

Para a aquisição dos dados cinemáticos, foi utilizado um módulo com sensor de efeito Hall KY003, o qual faz a leitura por detecção de eventos de proximidade com o imã de neodímio preso à roda do sistema de bancada (Thomazini; Albuquerque, 2011). A Figura 4 representa o sensor, o qual foi fixado em uma base impressa em 3D, equipada com um suporte articulado para ajuste de posição, de modo a garantir uma coleta estável e consistente do campo magnético gerado pelo imã.



Figura 04: Sensor de efeito hall KY003 em base articulada.
Fonte: autores (2025)

O registro temporal das medições é realizado por meio de um módulo de relógio de tempo real RTC3231, garantindo associação entre os dados coletados e seus respectivos instantes de ocorrência. Os dados adquiridos são armazenados em um cartão SD, em formato de arquivo estruturado (CSV), possibilitando posterior processamento e análise em ambiente computacional. A escolha técnica pelo uso de cartões SD justifica-se pela sua ampla aplicação em sistemas embarcados, sendo sua principal função o armazenamento de dados em sistemas que necessitam gravar variáveis temporais, como os *data loggers*. Além disso, a comunicação com o microcontrolador é facilitada pela operação no modo SPI, considerado mais adequado e fácil de programar por utilizar exclusivamente os pinos dedicados da interface (MISO, MOSI, CLK e SS) (Lima; Villaça, 2012, p.331). A organização dos dados contempla a identificação de sessões de operação por meio de um identificador de inicialização, permitindo a segregação e rastreabilidade das informações coletadas.

Adicionalmente, o sistema integra recursos auxiliares voltados à interação com o usuário e ao monitoramento do estado operacional do sistema durante sua operação. Um buzzer ativo foi integrado ao sistema com a finalidade de fornecer sinalização sonora em eventos operacionais específicos, como inicialização do sistema e a ausência do cartão SD, contribuindo para a verificação do correto funcionamento do equipamento.

Para a visualização em tempo real das informações, foram utilizados dois displays do tipo OLED SSD1306 (Figura 5), promovendo a apresentação simultânea de diferentes conjuntos de dados durante a operação do sistema. Essa configuração viabiliza a organização das variáveis monitoradas em blocos distintos, favorecendo a leitura e interpretação das informações pelo usuário. A comunicação com os displays é realizada por meio de um multiplexador PCA9548A de oito canais de barramento I^2C, garantindo a utilização de múltiplas telas com endereços idênticos. Essa abordagem permite ainda a expansão da arquitetura para integração de novos dispositivos.



Figura 05: Par de displays OLED.
Fonte: autores (2025)

O delineamento experimental foi estruturado especificamente para as condições deste estudo, estabelecendo-se 4 níveis de excitação do motor, correspondentes a diferentes valores de Modulação por Largura de Pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*) aplicados via código na saída do Arduino. O controle do motor foi implementado a partir de um código previamente desenvolvido no âmbito do Laboratório de Prototipagem e Sistemas Embarcados (LAPSE/UNIFAL), o qual foi adaptado para permitir a rotação contínua do motor sob diferentes níveis de PWM, denominados de larguras de pulso.

Para cada largura de pulso de PWM, foram realizadas três sessões de coleta independentes, onde cada sessão consistiu na detecção de 30 eventos de rotação, totalizando 120 eventos por nível de excitação e 360 eventos no conjunto do experimento. Os diferentes níveis de PWM foram empregados para representar, de forma simplificada, as distintas condições operacionais do sistema.

A Tabela 1 mostra a relação entre os valores de PWM aplicados via código e seus respectivos percentuais de largura de pulso.

PWM	Largura de Pulso (%)
128	50
155	60
193	75
255	100

Tabela 01: Relação entre PWM e largura de pulso.
Fonte: autores (2026)

No que se refere ao processamento do dados, os registros adquiridos pelo sistema embarcado são exportados em formato CSV e submetidos a um processo de organização e tratamento em ambiente computacional. Para tal, foi adotada uma abordagem baseada na utilização do Microsoft Excel, em conjunto com a ferramenta Microsoft Power Query, permitindo a automação das etapas de importação, transformação e organização dos dados.

O fluxo de processamento foi estruturado de forma a viabilizar a leitura de múltiplos arquivos provenientes de diferentes sessões de operação, assegurando a padronização das informações e a consolidação dos dados em uma base única para análise. Durante o tratamento, foram realizadas etapas de organização e enriquecimento dos dados, incluindo a criação de variáveis derivadas a partir das medições originais. Dentre essas variáveis, destaca-se o cálculo do deslocamento incremental entre registros consecutivos do sensor de efeito Hall, obtido com base na variação da distância acumulada ao longo do tempo.

A figura 6 ilustra um fluxo semiautomatizado de coleta e processamento adotado, o qual contribui para a reprodutibilidade das análises, reduzindo a necessidade de intervenção manual e minimizando a ocorrência de erros durante o tratamento de dados.

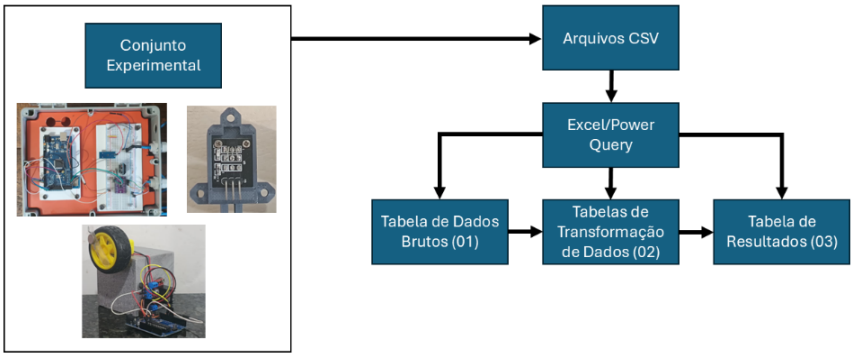


Figura 06 – Fluxo de coleta e processamento.
Fonte: autores (2026)

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos indicam o funcionamento do sistema de aquisição de dados desenvolvido, o qual se mostrou capaz de gerar arquivos CSV de forma consistente ao longo das sessões de ensaio. O uso do indicador de inicialização permite a criação automática de arquivos sequenciais a cada ativação ou reinicialização do sistema, possibilitando a organização e rastreabilidade dos dados desde sua origem. A cada reset realizado no Arduino Mega, um novo arquivo é gerado e nomeado com base nesse identificador, garantindo a distinção entre as sessões de coleta. Adicionalmente, a integração com o módulo RTC permite a associação dos dados coletados a informações de data e horário, estabelecendo uma referencia temporal para análise dos ensaios realizados.

As informações exibidas em tempo real nos displays apresentaram compatibilidade com os dados registrados nos arquivos, o que sugere consistência consistência na aquisição e no armazenamento das variáveis monitoradas. Essa compatibilidade permite a verificação das medições durante a execução dos ensaios, enquanto a consistência observada na aquisição e no armazenamento dos dados possibilita a aplicação de rotinas automatizadas de processamento por meio do Power Query, permitindo a importação, transformação e análise dos dados de forma sistemática e com intervenção manual consideravelmente reduzida. Nesse contexto, o *data logger* não apenas realiza a aquisição, mas também contribui para a organização dos dados para etapas posteriores de análise.

No que se refere ao comportamento do sistema de bancada, após a energização do conjunto experimental, foi feita a análise do comportamento do sistema em função das variações de PWM. A tabela 2 apresenta os intervalos entre eventos detectados, ilustrando a influência dos níveis de PWM na frequência de detecção.

PWM	▲T médio (s)	Desvio padrão (s)
128	0,72	0,002
155	0,66	0,12
193	0,59	0,11
255	0,52	0,001

Tabela 02: Intervalo entre eventos detectados em função dos níveis de PWM. Fonte: autores (2026)

A relação entre os níveis de PWM e a velocidade média obtida é apresentada na figura 7, evidenciando aumento progressivo da velocidade com o incremento da excitação aplicada.

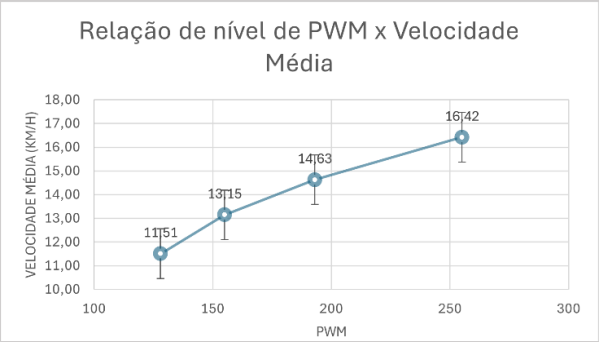


Figura 07: Velocidade média em função dos níveis de PWM. Fonte: autores (2026)

Observa-se que os valores médios de velocidade demonstram baixa dispersão entre as repetições para cada nível aplicado de PWM, conforme indicado pelos valores de desvio padrão reduzidos, evidenciando a consistência e a repetitividade dos ensaios realizados.

De forma complementar, a figura 8 apresenta a combinação entre os níveis de PWM e o tempo total de percurso em cada sessão. A análise conjunta dos resultados reforça a coerência do comportamento do sistema experimental, indicando consistência entre as variáveis analizadas.

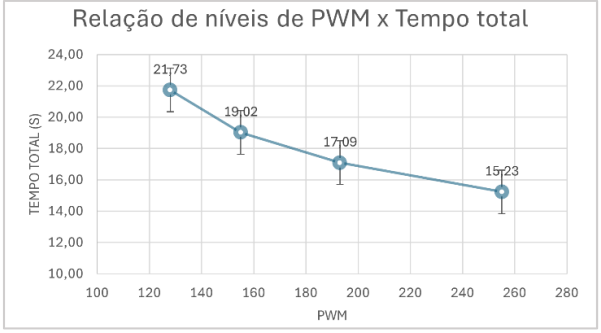


Figura 08: Tempo total de percurso obtido para diferentes níveis de PWM. Fonte: autores (2026)

Esse comportamento está em conformidade com a dinâmica esperada do conjunto experimental, no qual os maiores níveis de excitação promovem aumento da velocidade de rotação da roda e, consequentemente, maior frequência de detecção de eventos. Verificou-se, ainda, consistência na relação entre o número de eventos detectados e a distância percorrida. Considerando 30 eventos por sessão e a circunferência da roda adotada, a distância total manteve-se aproximadamente constante entre as sessões, o que sugere repetitividade no processo de aquisição e estabilidade na detecção de eventos.

Os níveis de PWM foram utilizados como parâmetro de controle da excitação do motor. O valor mínimo de 50% foi adotado em função da limitação operacional do motor DC com redução, o qual não apresentou movimento funcionamento adequado em valores inferiores. Como limitação do presente estudo, destaca-se a ausência de medição direta das variáveis elétricas, uma vez que a excitação foi controlada exclusivamente via PWM, sem o registro da tensão efetivamente aplicada ao motor.

Considerações Finais

O presente estudo alcançou o objetivo proposto ao validar a operacionalidade do *data logger* desenvolvido em ambiente experimental de bancada. Os resultados demonstraram que a arquitetura construída, baseada no microcontrolador Arduino Mega, integrada ao sensor de efeito Hall, módulo sd e RTC 3231, foi capaz de registrar as variáveis cinemáticas de forma consistente e com alta repetitividade sob diferentes larguras de pulsos PWM.

Aliado a isso, a adoção de um fluxo semiautomatizado utilizando o Microsoft Power Query para o processamento dos arquivos CSV mostrou-se uma estratégia eficiente, viabilizando o tratamento de dados com mínima intervenção manual e garantindo a reprodutibilidade das análises.

Embora o estudo apresente como limitação a ausência de medição direta das grandezas do motor, a estabilidade comprovada na detecção de eventos mecânicos e no registro temporal pelo módulo RTC assegura confiabilidade da arquitetura de aquisição elaborada.

Por fim, conclui-se que o *data logger* apresenta a robustez necessária para as próximas etapas da pesquisa. Ressalta-se que a medição das variáveis elétricas e o seu respectivo cruzamento com os dados cinemáticos já estão em processo de implementação em um protótipo de triciclo elétrico leve. Este veículo já se encontra operacional e constitui objeto de estudo da tese de doutorado em andamento do primeiro autor do presente trabalho. Essa etapa em condições reais de micromobilidade será fundamental para avaliar o desempenho energético do veículo na prática, gerando indicadores essenciais para subsidiar o desenvolvimento de soluções de transporte de baixo impacto ambiental e fundamentar a transição energética nos centros urbanos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) pelo apoio financeiro e institucional recebido. Agradecem, ainda, ao Laboratório de Prototipagem e Sistemas Embarcados (LAPSE - UNIFAL) pelo suporte técnico e disponibilização de infraestructura e materiais. Por fim, estendem seus agradecimentos à organização do evento.

Referências Bibliográficas

DAI, J. et al. Transport infrastructure, economic growth, and transport CO2 emissions nexus: Does green energy consumption in the transport sector matter? Environmental Science and Pollution Research, v. 30, n. 14, 6 jan. 2023.

FILONCHYK, M. et al. Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO2, CH4, and N2O. Science of the total environment, v. 935, n. 935, p. 173359–173359, 1 maio 2024.

LIMA, C. B. de; VILLAÇA, M. V. M. AVR e Arduino: técnicas de projeto. 2. ed. Florianópolis: [s. n.], 2012.

MBANDI, A. M. et al. Assessment of the impact of road transport policies on air pollution and greenhouse gas emissions in Kenya. Energy Strategy Reviews, v. 49, p. 101120–101120, 1 set. 2023.

MUNIYANDY, E. et al. Development of Telemetry system for Student Formula Cars and All-terrain vehicles. ResearchGate, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/370892029. Acesso em: 3 maio 2026.

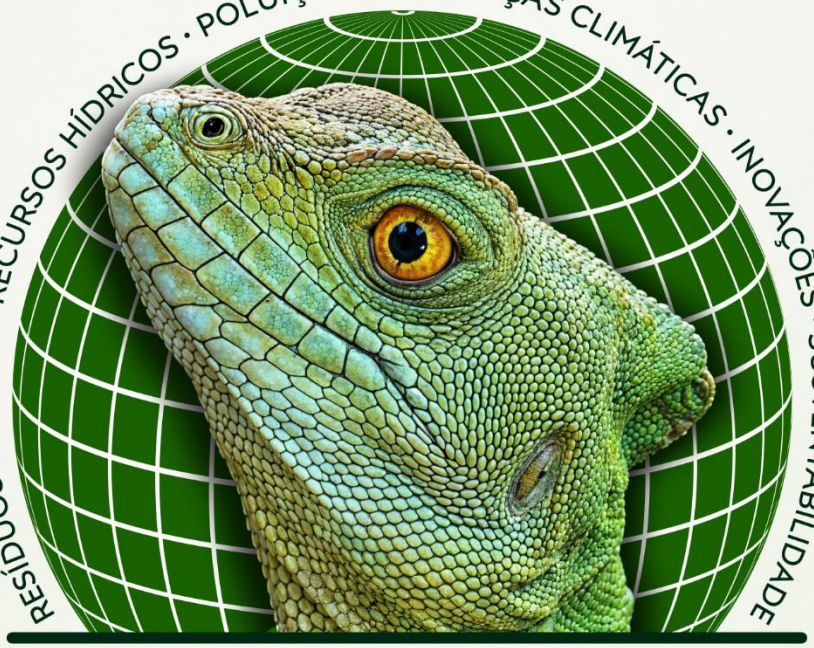
RAMDEANE, A. Low cost seismic data acquisition system based on open source hardware and software tools. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TRENDS IN ENGINEERING & TECHNOLOGY (ICONETECH), 2020, Trinidad and Tobago. Anais [...]. Trinidad and Tobago: The University of the West Indies, 2020.

RAVIV, G. Collect, Combine, and Transform Data Using Power Query in Excel and Power BI. 1. ed. Redmond: Microsoft Press, 2018.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações. 8. ed. São Paulo: Érica, 2011.

ÁREA TEMÁTICA 20

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E EVENTOS EXTREMOS



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

SENSIBILIDADE TEMPORAL DO PARÂMETRO GRADEX E IMPLICAÇÕES NO DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

1 Waldemir Correa dos Santos Sobrinho, 2 Vinicius de Azevedo Silva, 3 Alex Lima Amorim, 4 Antonio Carlos Zuffo
1Universidade Estadual de Campinas, e-mail:w194122@dac.unicamp.br; 2 Universidade Estadual de Campinas, e-mail:vinicius@azevedoambiental.com; 3 Universidade Estadual de Campinas, e-mail:a290240@dac.unicamp.br; 4 Universidade Estadual de Campinas, e-mail: aczuffo@unicamp.br

Palavras-chave: Gradex; Eventos; Extremos.

Resumo

A estimativa de vazões máximas associadas a grandes tempos de retorno é fundamental para o dimensionamento de estruturas hidráulicas e, no método Gradex, depende diretamente do coeficiente angular da distribuição de Gumbel (parâmetro Gradex). Este estudo avaliou a estabilidade temporal desse parâmetro em diferentes janelas históricas aplicadas à bacia do rio Camanducaia, utilizando séries de precipitação e vazão no período de 1936 a 2025. O método foi aplicado de forma consistente em todas as segmentações temporais, mantendo-se constantes os critérios de extração de máximos anuais e o ajuste estatístico, enquanto a incerteza das estimativas foi avaliada por reamostragem bootstrap e teste de significância da diferença entre janelas. Os resultados indicaram variações relativas do parâmetro Gradex de até 33,6% entre períodos multidecadais, com parte das diferenças estatisticamente significativa, propagando-se de forma proporcional para a componente extrapolada das vazões associadas a grandes tempos de retorno. Esses achados evidenciam que a escolha da janela histórica pode influenciar de forma relevante as estimativas de cheias extremas, reforçando a necessidade de análises de sensibilidade temporal em estudos de frequência de vazões e no dimensionamento hidráulico. Cabe ressaltar que a janela 2011–2025 apresenta tamanho amostral reduzido (n = 15), exigindo cautela na interpretação dos resultados desse subperíodo.

Introdução

A estimativa de vazões máximas associadas a grandes tempos de retorno constitui etapa fundamental no dimensionamento de estruturas hidráulicas, tais como barragens, vertedores e sistemas de macrodrenagem. Tradicionalmente, tais estimativas são realizadas sob a hipótese de estacionariedade estatística, assumindo que os parâmetros das distribuições de extremos permanecem constantes ao longo do tempo. No entanto, evidências recentes na literatura hidrológica têm questionado essa premissa, destacando a influência de variabilidade climática de baixa frequência e possíveis mudanças estruturais nos regimes hidrológicos.

Entre os métodos amplamente utilizados para extrapolação de cheias extremas destaca-se o método Gradex, originalmente proposto por Duband e Guillot (1968) e posteriormente adaptado ao contexto brasileiro por Zuffo (1993). O método baseia-se na hipótese de paralelismo entre as curvas de frequência de precipitação extrema e vazão máxima, sendo o parâmetro de inclinação da distribuição de Gumbel, denominado parâmetro Gradex, elemento central na extrapolação para grandes períodos de retorno.

Apesar da ampla aplicação do método em estudos de segurança hidráulica, a estabilidade temporal do parâmetro Gradex raramente é investigada de forma explícita. A escolha do período histórico utilizado no ajuste estatístico pode influenciar diretamente o valor estimado da inclinação, e, consequentemente, as vazões de projeto associadas a tempos de retorno elevados. Em contextos de possível variabilidade multidecadal, tal sensibilidade pode ter implicações relevantes para o dimensionamento de estruturas críticas.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo avaliar a variação temporal do parâmetro Gradex em diferentes janelas históricas aplicadas à bacia do rio Camanducaia (posto 3D-001) e quantificar o impacto dessa variação nas vazões de projeto associadas a grandes tempos de retorno. Para assegurar comparabilidade, o método é aplicado de forma consistente em todas as janelas temporais, mantendo-se constantes os critérios de extração de máximos e o procedimento de ajuste estatístico.

Fundamentação Teórica - Método Gradex

O método do Gradiente de Extremos (Gradex) foi proposto na França por Duband e Guillot (1968) com o objetivo de estimar vazões associadas a grandes tempos de retorno, especialmente em aplicações de segurança hidráulica, como barragens e obras de controle de cheias. Inicialmente adotado pelo EDF (Électricité de France), o método consolidou-se como parte da tradição hidrológica francesa (Paquet et al., 2006).

A base conceitual do Gradex está na hipótese física de saturação progressiva da bacia para eventos raros. À medida que o período de retorno aumenta, as perdas por infiltração tornam-se relativamente pequenas em comparação ao volume precipitado adicional, e o sistema hidrológico passa a responder de forma aproximadamente linear ao excedente de chuva. Assim, no domínio das probabilidades raras, admite-se que o crescimento das vazões máximas segue aproximadamente o mesmo gradiente estatístico da precipitação extrema.

Sob o ponto de vista probabilístico, utiliza-se a distribuição de Gumbel para modelar máximos anuais. A variável reduzida associada ao período de retorno T é definida por:

$$y_T = -\ln\left[-\ln\left(1-\frac{1}{T}\right)\right],$$

o que permite linearizar a distribuição de extremos e representar as séries em papel probabilístico.

Para uma série de máximos anuais com média $\bar{x}$ e desvio padrão σ, os parâmetros da distribuição de Gumbel pelo método dos momentos são estimados por:

$$a = \frac{\sigma}{1{,}2825}$$
$$\beta = \bar{x} - 0{,}5772\, a$$

em que:

- aé o coeficiente angular (inclinação),
- βé o parâmetro de posição,
- 1,2825 e 0,5772 correspondem, respectivamente, ao desvio padrão e à constante de Euler da distribuição reduzida de Gumbel.

A equação linearizada assume então a forma:

$$x_T = \beta + a\, y_T$$

em que x_Té o valor associado ao período de retorno T.

No método Gradex, ajusta-se inicialmente a reta da precipitação extrema. A partir de um período de retorno de referência T_0(tipicamente 10 anos), traça-se uma reta paralela para a vazão, com o mesmo coeficiente angular a, traduzindo matematicamente o paralelismo entre chuva e escoamento no domínio extremo, como exposto na Figura a seguir.

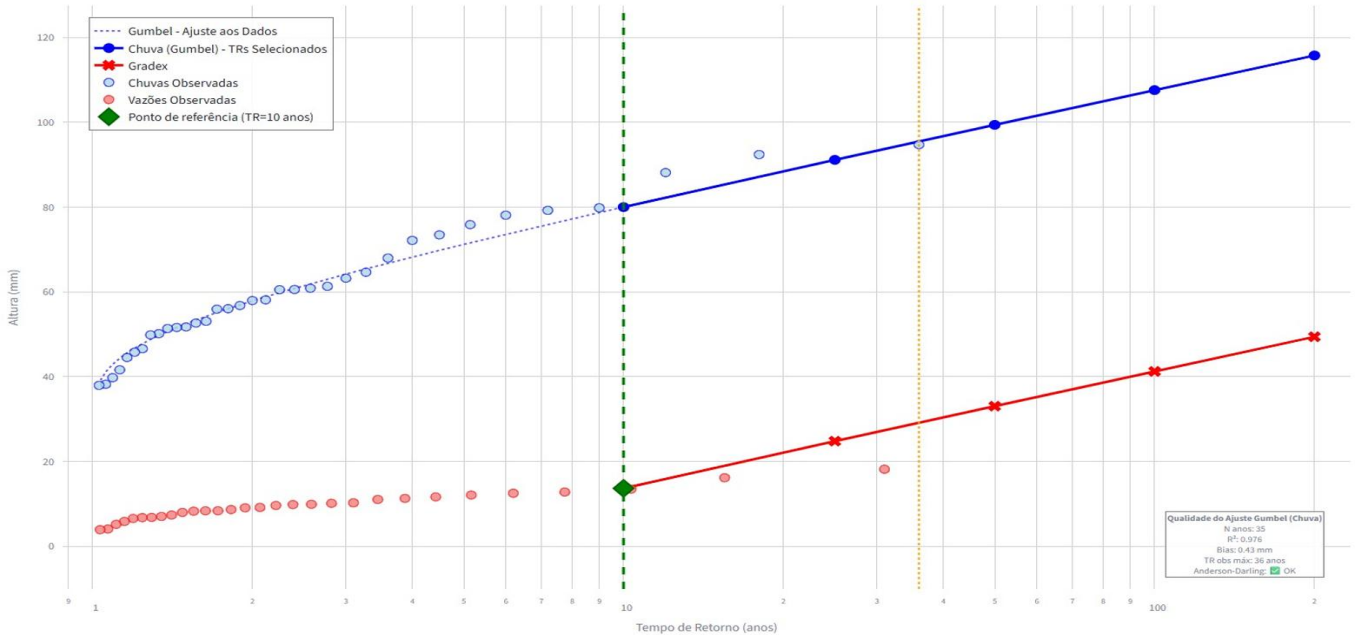


Figura 1 – Extrapolação da distribuição de extremos do volume escoado, com escoamento a partir de TR = 10 anos, e a paralela do volume precipitado. Fonte: Os Autores

De forma incremental, a extrapolação pode ser expressa por:

$$Q(T) \approx Q(T_0) + [P(T) - P(T_0)]$$

em que $P(T)$representa o volume precipitado associado ao período de retorno T.

A determinação da vazão de pico pode ser realizada a partir da vazão média extrapolada, por meio de um fator de pico R:

$$Q_{\text{pico}} = Q_{\text{médio}} \cdot R$$

com

$$R = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{Q_{\text{pico},i}}{Q_{\text{médio},i}}$$

Segundo Zuffo (1993), o método apresenta como principal vantagem a possibilidade de utilização de séries fluviométricas relativamente curtas, desde que existam séries pluviométricas longas e bem distribuídas espacialmente. A precipitação é medida pontualmente, enquanto a vazão representa a resposta integrada da bacia, sendo essa integração um dos fundamentos físicos do método.

Sensibilidade do Parâmetro Gradex

O parâmetro $\boldsymbol{a}$, denominado parâmetro Gradex, desempenha papel central na extrapolação de vazões extremas. Observa-se que sua estimativa depende diretamente do desvio padrão da série de máximos anuais. Assim, variações na magnitude ou frequência de eventos extremos dentro do período analisado podem alterar significativamente o valor de $\boldsymbol{a}$, modificando a inclinação da reta ajustada no papel probabilístico.

Como consequência, a escolha da janela histórica utilizada para o ajuste estatístico pode influenciar diretamente as vazões estimadas para grandes períodos de retorno. Alterações estruturais na série, sejam decorrentes de variabilidade climática, mudanças de regime hidrológico ou simplesmente flutuações amostrais, podem refletir-se em variações no parâmetro Gradex, impactando a extrapolação das cheias de projeto.

Essa dependência torna relevante a investigação da estabilidade temporal do parâmetro $\boldsymbol{a}$, especialmente quando o método é empregado em análises de segurança hidráulica, nas quais pequenas variações na inclinação da curva podem resultar em diferenças significativas nas vazões estimadas para tempos de retorno elevados.

Limitações do Método

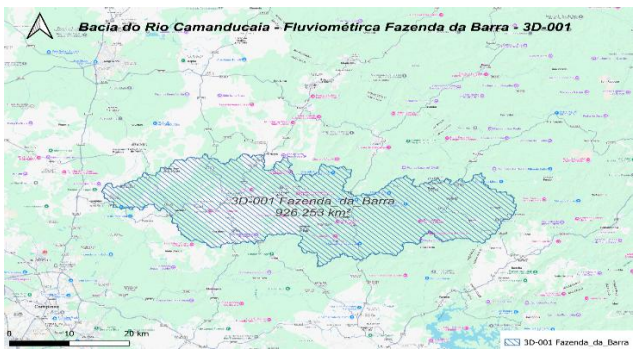
O método Gradex apresenta sensibilidade às características físicas da bacia, sendo menos preciso em solos de alta permeabilidade, nos quais a hipótese de saturação pode não se verificar plenamente. Também é usualmente recomendado para bacias de até aproximadamente 5.000 km², pois em áreas muito extensas a variabilidade espacial da precipitação reduz a validade da hipótese de paralelismo estatístico.

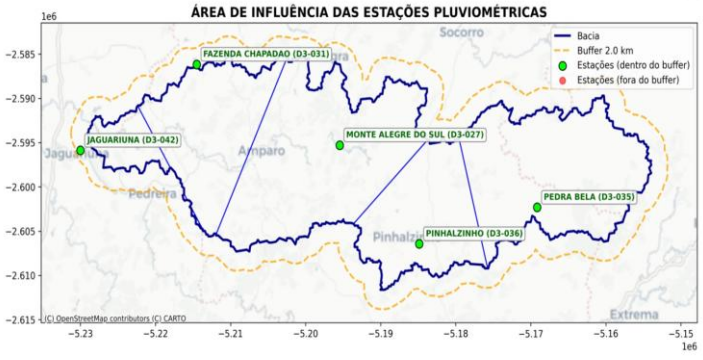
Adicionalmente, a definição do ponto inicial de extrapolação envolve certo grau de julgamento técnico, o que pode introduzir variações nos resultados. Essas limitações reforçam a importância de análises de sensibilidade e avaliação crítica dos parâmetros estimados.

Características físicas da bacia hidrográfica do Camanducaia.

A bacia hidrográfica analisada corresponde ao rio Camanducaia no posto fluviométrico 3D-001, com área de drenagem aproximada de 925 km², selecionada em função de sua elevada disponibilidade e consistência de séries históricas de precipitação e vazão. Foram utilizadas cinco estações pluviométricas (D3-042, D3-031, D3-027, D3-036 e D3-035) para representação espacial da chuva e a estação fluviométrica 3D-001 como seção de controle de vazões.

A bacia está localizada a cerca de 150 km da cidade de São Paulo e abrange municípios como Serra Negra, Monte Alegre do Sul, Pinhalzinho, Pedra Bela e Munhoz, inserindo-se em região de clima Cfb segundo Köppen, caracterizado como temperado úmido, sem estação seca definida e com temperaturas médias mensais moderadas. Do ponto de vista fisiográfico, a bacia apresenta relevo predominantemente ondulado a fortemente ondulado, com cabeceiras em áreas serranas e rede de drenagem encaixada, o que favorece resposta hidrológica relativamente rápida nos eventos intensos. A ocupação urbana é, em termos proporcionais de área, pouco acentuada quando comparada ao total da bacia, com predomínio de usos rurais, vegetação e mosaicos agropecuários. Esse conjunto de características físicas torna a bacia adequada para estudos de extremos hidrológicos e aplicação do método Gradex com suporte de ponderação espacial por Thiessen.





Figuras 2 e 3 – Localização da Bacia do Camanducaia e disposição dos postos pluviométricos da área, com delimitação por polígonos de Thiessen. Fonte: Os Autores

Metodologia de Análise por Regimes

A metodologia adotada foi estruturada em duas etapas complementares: (I) verificação de consistência do período total e (II) avaliação da variação temporal do parâmetro Gradex em janelas históricas segmentadas.

Verificação no Período de Referência

Na primeira etapa, o método foi aplicado durante o período total de dados, mantendo constantes todas as escolhas de modelagem, a saber:

critérios de extração de máximos anuais;
ajuste da distribuição de Gumbel pelo método dos momentos;
mesmas durações de chuva e tempo de base da vazão;
mesmo procedimento de ponderação espacial da precipitação.

Os resultados obtidos foram comparados com os valores de referência do posto 3D-001, realizando-se comparação parâmetro por parâmetro do Gradex (coeficiente angular $\boldsymbol{a}$). A discrepância foi quantificada por meio da diferença relativa percentual:

$$\boldsymbol{\Delta\%} = \mathbf{100} \cdot \frac{\boldsymbol{X}_{\text{periodo}} - \boldsymbol{X}_{\text{total}}}{\boldsymbol{X}_{\text{total}}}$$

em que $\boldsymbol{X}_{total}$ corresponde ao valor obtido no intervalo 1936-2025 e $\boldsymbol{X}_{\text{periodo}}$ ao valor obtido nos períodos multidecadais.

Essa etapa assegura a consistência metodológica do procedimento adotado antes da análise comparativa entre diferentes janelas temporais.

Segmentação Temporal

Na segunda etapa, o método foi aplicado a janelas históricas segmentadas com o objetivo de avaliar a estabilidade temporal do parâmetro Gradex durante as janelas multidecadais. As seguintes janelas foram consideradas:

1. 1936–1975
2. 1976–2010
3. 2011–2025
4. 1936–2025 (período total - referência)

Para garantir comparabilidade entre períodos, foram mantidas constantes todas as premissas metodológicas, incluindo:

- ponderação espacial por Thiessen;
- extração de máximos anuais;
- ajuste da distribuição de Gumbel;
- método de estimação dos parâmetros.

Assim, eventuais diferenças observadas no parâmetro Gradex decorrem exclusivamente das características estatísticas das amostras dentro de cada intervalo temporal.

Os valores estimados para cada janela foram consolidados em tabela comparativa, calculando-se as diferenças percentuais entre janelas sucessivas e em relação ao período total.

Estimativa do Parâmetro Gradex

Para cada janela, ajustou-se a distribuição de Gumbel às séries de máximos anuais, estimando-se os parâmetros pelo método dos momentos. O coeficiente angular (parâmetro Gradex) foi calculado como:

$$\boldsymbol{a} = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{\mathbf{1,2825}}$$

em que $\boldsymbol{\sigma}$ representa o desvio padrão da série na respectiva janela.

Os valores obtidos constituem a base para análise comparativa entre períodos.

Estimativa de Incerteza por Reamostragem Bootstrap

Com o objetivo de avaliar a variabilidade amostral do parâmetro Gradex, foi aplicado o método de reamostragem bootstrap não paramétrico, técnica estatística baseada na geração de múltiplas amostras artificiais obtidas por reamostragem com reposição a partir da amostra original. O bootstrap permite estimar a distribuição empírica de um estimador sem assumir forma paramétrica para a população subjacente.

Seja uma janela temporal contendo $\boldsymbol{n}$ máximos anuais $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Foram geradas $B = 20.000$ reamostragens com reposição, cada uma composta por $\boldsymbol{n}$ observações:

$$\{x_1^{*(b)}, x_2^{*(b)}, \dots, x_n^{*(b)}\}, b = 1,2, \dots, B$$

Para cada reamostragem $\boldsymbol{b}$, calculou-se o desvio padrão amostral:

$$\sigma^{*(b)} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i^{*(b)} - \bar{x}^{*(b)}\right)^2}$$

e, consequentemente, o parâmetro Gradex:

$$a^{*(b)} = \frac{\sigma^{*(b)}}{1{,}2825}$$

A distribuição empírica $\{a^{*(1)}, a^{*(2)}, \ldots, a^{*(B)}\}$foi então utilizada para estimar:

- a média bootstrap do parâmetro:

$$\bar{a}_{boot} = \frac{1}{B}\sum_{b=1}^{B} a^{*(b)}$$

- o desvio padrão bootstrap (erro padrão do estimador):

$$s_{boot} = \sqrt{\frac{1}{B-1}\sum_{b=1}^{B}\left(a^{*(b)} - \bar{a}_{boot}\right)^2}$$

- o intervalo de confiança de 95%, obtido pelo método dos percentis:

$$IC_{95\%} = \left[a^{*(2{,}5\%)},\ a^{*(97{,}5\%)}\right]$$

em que $a^{*(2{,}5\%)}$e $a^{*(97{,}5\%)}$correspondem, respectivamente, aos percentis 2,5% e 97,5% da distribuição bootstrap.

Esse procedimento permite quantificar a incerteza associada à estimativa do parâmetro Gradex em cada janela temporal, considerando exclusivamente a variabilidade amostral observada na própria série histórica.

Teste de Diferença entre Janelas

Para avaliar a significância estatística das diferenças observadas entre janelas temporais, foi empregada análise bootstrap da diferença.

Para cada par de janelas comparadas (A e B), calculou-se:

$$\boldsymbol{\Delta a = a_A - a_B}$$

A distribuição empírica de $\boldsymbol{\Delta a}$ foi obtida por reamostragem conjunta, e a significância foi avaliada com base no intervalo de confiança de 95%. Diferenças foram consideradas estatisticamente significativas quando o intervalo não incluiu o valor zero.

Avaliação do Impacto nas Vazões de Projeto

Com base nos parâmetros estimados em cada janela, foram calculadas as vazões associadas aos períodos de retorno de: 100 anos,500 anos,1000 anos.

A extrapolação foi realizada conforme a formulação clássica do método Gradex, mantendo constante o período de referência $\boldsymbol{T_0}$.

As diferenças percentuais entre as vazões estimadas foram calculadas como:

$$\Delta Q(\%) = \frac{Q_i - Q_{\text{ref}}}{Q_{\text{ref}}} \times 100$$

em que $\boldsymbol{Q}_{\text{ref}}$ corresponde ao valor estimado para o período total.

Essa análise permite quantificar o impacto prático da variação temporal do parâmetro Gradex no dimensionamento hidráulico.

Para auxiliar na interpretação das diferenças observadas entre os parâmetros Gradex estimados em cada janela temporal, foram analisados os valores máximos de precipitação acumulada para as diferentes durações consideradas. A comparação dos máximos observados em cada período permite avaliar como a presença de eventos extremos influencia a dispersão das séries de máximos anuais e, consequentemente, o valor estimado do parâmetro Gradex.

Estatísticas dos máximos anuais por período				
Período	**n (anos)**	**Máximo observado (mm)**	**Média dos máximos (mm)**	**Desvio padrão (mm)**
1936–1975	36	103.01	58.77	15.62
1976–2010	35	108	68.8	17.17
2011–2025	15	143.07	89.91	24.8
1936–2025	86	117.69	64.92	18.12

Tabela 1 – Máximos utilizados por segmento temporal Fonte: Os Autores

Resultados

Estabilidade Temporal do Parâmetro Gradex (1–3 dias)

Os valores do parâmetro Gradex foram estimados para as durações de 1, 2 e 3 dias considerando quatro janelas temporais: 1936–1975, 1976–2010, 2011–2025 e o período agregado 1936–2025. A análise foi estruturada priorizando a comparação entre os dois intervalos multidecadais mais extensos (1936–1975 e 1976–2010), por apresentarem maior robustez amostral.

Para a duração de 1 dia, os valores estimados foram 12,18 para o período 1936–1975 e 13,39 para 1976–2010. A diferença absoluta entre os dois regimes foi Δa = 1,206, correspondendo a aumento relativo de aproximadamente 9,9% no segundo período. O período total 1936–2025 apresentou valor intermediário (14,13), enquanto o intervalo mais recente 2011–2025 registrou 16,96, valor superior aos demais, embora deva ser interpretado com cautela devido ao reduzido número de anos disponíveis.

Para a duração de 2 dias, observou-se variação mais pronunciada entre os regimes históricos. Os valores estimados foram 14,28 para 1936–1975 e 19,08 para 1976–2010. A diferença absoluta foi Δa = 4,80, correspondente a aumento relativo de aproximadamente 33,6% no segundo período. O período agregado apresentou valor intermediário (17,93), refletindo o efeito de suavização decorrente da agregação de diferentes regimes hidrológicos ao longo da série.

Para a duração de 3 dias, os parâmetros estimados foram 22,18 para 1936–1975 e 23,39 para 1976–2010. A diferença absoluta foi Δa = 1,21, equivalente a aumento relativo de aproximadamente 5,5%, indicando maior estabilidade entre os dois regimes quando comparado à duração de 2 dias. O período total apresentou valor muito próximo ao segundo regime (23,41), reforçando o caráter intermediário da série agregada.

De modo geral, os resultados indicam que a inclinação da curva de frequência de extremos apresenta variações entre os regimes multidecadais analisados, sendo a maior sensibilidade observada para a duração de 2 dias.

Análise de Incerteza do Parâmetro Gradex

A variabilidade amostral do parâmetro Gradex foi avaliada por meio de reamostragem bootstrap não paramétrica. Para cada janela temporal foram realizadas 20.000 reamostragens com reposição, preservando o tamanho amostral original. Em cada reamostragem foi recalculado o desvio padrão da série de máximos anuais e, consequentemente, o parâmetro Gradex:

$$a = \frac{\sigma}{1.2825}$$

A distribuição empírica resultante permitiu estimar a média bootstrap, o erro padrão bootstrap e os intervalos de confiança de 95%.

Para a duração de 1 dia, os intervalos de confiança obtidos indicaram sobreposição parcial entre os períodos 1936–1975 e 1976–2010, sugerindo que a diferença observada entre os regimes é moderada quando considerada a variabilidade amostral.

Para a duração de 2 dias, a diferença entre os parâmetros estimados nos dois períodos multidecadais mostrou-se mais pronunciada em relação à variabilidade amostral estimada, indicando alteração mais consistente na inclinação da curva de frequência de extremos para essa duração.

Já para a duração de 3 dias, os intervalos de confiança apresentaram maior sobreposição, coerente com a menor diferença absoluta observada entre os regimes históricos.

No período 2011–2025, os intervalos de confiança foram significativamente mais amplos em todas as durações analisadas, refletindo o menor tamanho amostral disponível. Esse fator limita inferências estatísticas robustas para esse intervalo, devendo os resultados ser interpretados como indicativos de tendência e não como evidência conclusiva de mudança estrutural.

Significância Estatística das Diferenças entre Regimes

A significância das diferenças entre os parâmetros estimados nos períodos 1936–1975 e 1976–2010 foi avaliada por meio de bootstrap da diferença entre parâmetros.

Para a duração de 2 dias, a diferença observada (Δa = 4,80) apresentou intervalo de confiança que não inclui o valor zero, indicando diferença estatisticamente significativa ao nível de 95% de confiança.

Para a duração de 1 dia, a diferença apresentou significância marginal, em razão da sobreposição parcial entre os intervalos de confiança associados às duas janelas temporais.

Para a duração de 3 dias, a diferença não se mostrou estatisticamente robusta, uma vez que os intervalos bootstrap apresentam ampla sobreposição.

Esses resultados sugerem que a alteração entre os dois regimes multidecadais é mais consistente para eventos com duração intermediária (2 dias), enquanto eventos de 1 e 3 dias apresentam maior estabilidade relativa ao longo do período analisado.

Impacto nas Vazões de Projeto

Com base nos parâmetros Gradex estimados para cada regime hidrológico, foram calculadas as vazões associadas aos períodos de retorno de 100, 500 e 1000 anos.

Para as durações de 1 a 3 dias, observou-se que as diferenças no parâmetro Gradex se propagam diretamente para as vazões estimadas em grandes tempos de retorno, em razão da dependência exponencial da extrapolação da curva de frequência de extremos.

A maior sensibilidade foi novamente observada para a duração de 2 dias, na qual a diferença entre os períodos 1936–1975 e 1976–2010 resultou em variação expressiva nas estimativas associadas a grandes períodos de retorno.

O período agregado 1936–2025 apresentou valores intermediários, evidenciando que a agregação de regimes distintos produz um efeito de média que pode suavizar diferenças estruturais entre intervalos históricos.

Para o intervalo 2011–2025, observaram-se valores mais elevados para algumas durações, especialmente 1 dia. Entretanto, devido à limitação amostral desse período, tais estimativas devem ser interpretadas como indicativas de possível alteração recente na variabilidade dos extremos, carecendo de confirmação à medida que séries mais longas se tornem disponíveis.

Resultados por Regime Hidrológico

Comparação do Gradex em Diferentes Ciclos Multidecadais							
	1	2	3	4			
Duração (dias)	Gradex 1936–2025	Gradex 1936–1975	Gradex 1976–2010	Gradex 2011–2025	Δ% (1→2)	Δ% (1→3)	Δ% (1→4)
1	14.1319	12.1830	13.3887	16.9676	-13.79%	-5.26%	20.07%
2	17.9373	14.2805	19.0820	16.7248	-20.39%	6.38%	-6.76%
3	23.4181	22.1820	23.3918	20.7754	-5.28%	-0.11%	-11.28%
4	27.1017	28.9373	26.0663	24.1783	6.77%	-3.82%	-10.79%
5	29.6484	33.9622	25.5096	25.4519	14.55%	-13.96%	-14.15%
6	31.3153	37.0430	26.8930	24.4916	18.29%	-14.12%	-21.79%
7	33.6686	41.0399	27.6190	27.1484	21.89%	-17.97%	-19.37%

Tabela 2 – Resultados por Regime Hidrológico e as suas variações fonte:os autores

Discussão

Estabilidade Temporal do Parâmetro Gradex

Os resultados indicam que o parâmetro Gradex apresenta variação ao longo das janelas temporais analisadas, com diferenças relativas que atingem até 33,6% para determinadas durações. A análise bootstrap demonstrou que, para as durações de 2 dias, as diferenças entre os períodos 1936–1975 e 1976–2010 foram estatisticamente significativas, sugerindo que a inclinação da curva de frequência pode ser sensível ao intervalo histórico considerado.

Como o parâmetro a é diretamente proporcional ao desvio padrão da série de máximos anuais, sua variação reflete alterações na dispersão dos eventos extremos dentro de cada janela. Assim, diferenças no regime de ocorrência ou magnitude das cheias podem modificar a inclinação da reta ajustada no papel probabilístico de Gumbel.

Observa-se que, dentro do escopo estatisticamente testado (1 a 3 dias), a maior discrepância concentra-se na duração de 2 dias, enquanto durações de 1 e 3 dias apresentam diferenças menores e estatisticamente menos robustas. Cabe notar que a Tabela 2 também reporta valores para durações mais longas (4 a 7 dias), nas quais variações de magnitude comparável ou superior são observadas em relação ao período total , particularmente nos intervalos 1976–2010 e 2011–2025 ,, reforçando a evidência geral de instabilidade temporal do parâmetro Gradex, embora a análise formal de significância tenha sido restrita ao recorte 1–3 dias. Esse comportamento dependente da duração também foi observado por Zuffo (1993), que identificou um ponto de inflexão nas curvas Gradex para durações próximas a três dias, indicando possível mudança no regime hidrometeorológico predominante responsável pelos eventos extremos. Uma interpretação física consistente é que durações curtas tendem a refletir precipitações convectivas, de alta intensidade e curta duração, ao passo que durações maiores incorporam sistemas frontais e chuvas persistentes, mais sensíveis ao regime climático multidecadal. Essa distinção é compatível com a literatura sobre persistência hidrológica de longo prazo (Klemeš, 1974; Mandelbrot e Wallis, 1968, 1969; Salas et al., 1980; Montanari et al., 1997) e com as proposições de Campos e Zuffo (2019) sobre a utilidade do Gradex como ferramenta sensível a mudanças de ciclo hidrológico. Adicionalmente, Zuffo (1993) destaca que a estimativa do Gradex é sensível à representação espacial da precipitação, sendo influenciada pela quantidade e pela disposição dos pluviômetros na bacia, o que pode contribuir para diferenças mais pronunciadas em durações nas quais a variabilidade espacial da chuva exerce maior influência sobre os volumes acumulados.

Além disso, Zuffo (1993) destaca que a estimativa do Gradex é sensível à representação espacial da precipitação, sendo influenciada pela quantidade e pela disposição dos pluviômetros na bacia. Essa dependência pode contribuir para diferenças mais pronunciadas nas durações superiores a três dias, nas quais a variabilidade espacial da chuva tende a exercer maior influência sobre os volumes acumulados. Assim, o padrão observado sugere que a escala temporal do evento exerce influência na estabilidade do parâmetro Gradex, indicando possível diferenciação entre mecanismos hidrometeorológicos associados a diferentes durações.

Sensibilidade das Vazões de Projeto

A propagação das variações do parâmetro Gradex para as vazões estimadas é direta, uma vez que, na formulação clássica, a parcela extrapolada da vazão acima do período de referência cresce linearmente com o produto entre o parâmetro Gradex e a diferença das variáveis reduzidas de Gumbel. Considerando a maior diferença observada na duração de 2 dias (Δa = 4,80) e os valores de variável reduzida associados aos períodos de retorno de 10 e 1000 anos, a contribuição diferencial à parcela extrapolada de Q1000 é da ordem de 22 mm em volume equivalente, valor expressivo para fins de dimensionamento. A magnitude relativa desse impacto sobre o valor absoluto de Q1000 depende da vazão de referência adotada para T = 10 anos, mas a propagação proporcional confirma que diferenças no parâmetro Gradex se traduzem em alterações relevantes nas vazões associadas a grandes tempos de retorno.

Esse resultado evidencia que a escolha da janela histórica utilizada no ajuste estatístico não é neutra do ponto de vista do projeto hidráulico. Estruturas dimensionadas com base em intervalos caracterizados por menor dispersão dos extremos podem resultar em estimativas inferiores às obtidas em períodos com maior variabilidade.

Em termos práticos, esse incremento diferencial pode implicar diferenças relevantes em cotas de vertedores, volumes de reservatórios ou seções de macrodrenagem, especialmente em obras críticas de segurança nas quais pequenas variações na vazão de projeto têm implicações operacionais significativas.

Implicações para a Hipótese de Estacionariedade

Os resultados obtidos não pressupõem modelagem explícita de não estacionariedade, uma vez que o ajuste da distribuição de Gumbel foi realizado separadamente em cada janela temporal, assumindo estacionariedade interna a cada intervalo. No entanto, a variação observada entre janelas sugere que a hipótese de estacionariedade ao longo de toda a série histórica pode ser questionável do ponto de vista operacional.

Mesmo na ausência de modelagem paramétrica não estacionária, a simples segmentação temporal evidência que os parâmetros estimados dependem do período selecionado, reforçando a importância de análises de sensibilidade temporal em estudos de frequência de cheias.

Limitações do Estudo

Algumas limitações devem ser consideradas na interpretação dos resultados.

Primeiramente, a análise foi restrita a uma única bacia hidrográfica, o que impede generalizações imediatas para outras regiões com características climáticas e fisiográficas distintas.

Em segundo lugar, a janela 2011–2025 possui tamanho amostral reduzido (n = 15), o que pode ampliar a variabilidade estatística das estimativas, mesmo com a aplicação de bootstrap.

Adicionalmente, o método Gradex assume que o paralelismo entre precipitação e vazão permanece válido no domínio extremo, hipótese que pode ser sensível a alterações nas características físicas ou no uso do solo da bacia ao longo do tempo.

Essas limitações indicam que os resultados devem ser interpretados como evidência de sensibilidade temporal do parâmetro Gradex, e não como prova conclusiva de mudança estrutural permanente no regime hidrológico.

Considerações Finais

O presente estudo avaliou a estabilidade temporal do parâmetro Gradex em diferentes janelas históricas aplicadas à bacia do rio Camanducaia, bem como o impacto dessa variação nas vazões estimadas para grandes períodos de retorno.

Os resultados indicam que o coeficiente angular da distribuição de Gumbel apresenta variação entre intervalos multidecadais, com diferenças relativas que alcançam até 33,6% para determinadas durações. A análise de incerteza por bootstrap evidenciou que parte dessas diferenças é estatisticamente significativa, indicando que o parâmetro Gradex pode ser sensível à escolha do período histórico utilizado no ajuste.

A propagação dessa variação para as vazões de projeto demonstrou impacto relevante nos períodos de retorno elevados, com a parcela extrapolada de Q1000 apresentando incrementos diferenciais expressivos entre janelas, da ordem de 22 mm em volume equivalente para a duração de 2 dias. Esses resultados indicam que a seleção da janela temporal não é neutra sob a perspectiva do dimensionamento hidráulico, podendo influenciar estimativas críticas para obras de segurança.

Embora o método tenha sido aplicado de forma consistente em todas as janelas, assumindo estacionariedade interna a cada intervalo, a variabilidade observada entre períodos sugere a necessidade de análises de sensibilidade temporal em estudos de frequência de cheias. Tal abordagem pode contribuir para maior robustez nas decisões de projeto, especialmente em cenários de possível variabilidade hidrológica de longo prazo.

Recomenda-se que investigações futuras ampliem a análise para outras bacias hidrográficas e incorporem avaliações formais de não estacionariedade, de modo a aprofundar a compreensão sobre a estabilidade dos parâmetros do método Gradex em diferentes contextos hidrológicos.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Planejamento Ambiental, vinculado ao Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Estadual de Campinas, pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

CAMPOS, J. N. B.; ZUFFO, A. C. Análise da relação entre o Gradex e o efeito José e sua importância no dimensionamento ótimo de estruturas hidráulicas. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, 23., 2019, Foz do Iguaçu. Anais [...]. Porto Alegre: ABRH, 2019.

DUBAND, D.; GUILLOT, P. La méthode du Gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies. In: **Journées de l'Hydraulique**, 10., 1968, Paris. Paris: Société Hydrotechnique de France, 1968.

KLEMEŠ, V.
The Hurst phenomenon: a puzzle? *Water Resources Research*, v. 10, n. 4, p. 675–688, 1974.

MANDELBROT, B. B.; WALLIS, J. R.
Noah, Joseph and operational hydrology. *Water Resources Research*, v. 4, n. 5, p. 909–918, 1968.

MANDELBROT, B. B.; WALLIS, J. R.
Some long-run properties of geophysical records. *Water Resources Research*, v. 5, n. 2, p. 321–340, 1969.

MONTANARI, A.; ROSSO, R.; TAQQU, M. S.
Fractionally differenced ARIMA models applied to hydrologic time series: identification, estimation and simulation. *Water Resources Research*, v. 33, n. 5, p. 1035–1044, 1997.

PAQUET, E. et al. The Gradex method: recent developments and applications. **Journal of Hydrology**, v. 326, n. 1–4, p. 34–45, 2006.

SALAS, J. D.; DELLEUR, J. W.; YEVJEVICH, V.; LANE, W. L.
Applied modeling of hydrologic time series. Littleton: Water Resources Publications, 1980.

ZUFFO, A. C. Relações estatísticas entre precipitações intensas e vazões máximas: método Gradex. 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

ZUFFO, A. C.
O Sol, o motor das variabilidades climáticas. *Revista DAE*, v. 63, n. 200, p. 24–35, 2015.

SEGURANÇA DE BARRAGENS NOS CONTEXTOS DE EXTREMOS CLIMÁTICOS, UTILIZANDO ABORDAGENS DE MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA: UMA REVISÃO

1 Thainá Vieira Holz e 2 Benedito Claudio da Silva
1 UNIFEI, e-mail: thainaholz@hotmail.com e 2 UNIFEI, e-mail: silvabenedito@unifei.edu.br*
**Universidade Federal de Itajubá*

Palavras-chave: Desastres naturais; modelos hidrológicos; mudanças climáticas.

Resumo

O entendimento adequado sobre segurança de barragens é essencial para prevenir desastres com impactos socioeconômicos e ambientais. Este artigo revisa a literatura sobre conceitos e metodologias de modelagem hidrológica e hidráulica aplicadas à segurança de barragens sob cenários de extremos climáticos, destacando a relevância dessas modelagens para a gestão de riscos. A pesquisa empregou termos-chave em português e inglês para identificar estudos sobre segurança de barragens e modelagem hidrológica e hidráulica. Foram consideradas diversas fontes, como artigos, diretrizes e documentos técnicos, de diferentes países. As bases de dados incluíram a plataforma SCOPUS, a biblioteca do USACE, da ASDSO, os boletins do ICOLD/CIGB e CDA e os relatórios da ANA. A seleção priorizou a relevância e a qualidade metodológica, excluindo estudos irrelevantes e deficientes. A análise abordou a origem dos conceitos, definições, fatores de influência e metodologias de modelagem aplicadas a barragens. A pesquisa bibliométrica ocorreu através do programa VOSviewer e aponta que as principais palavras-chaves encontradas são “dam failure” e “hydrological modeling”, com 71 e 58 ocorrências, respectivamente. Já com relação aos países, foi constatado que a China e os Estados Unidos são os países que mais produzem documentos referente ao tema central da pesquisa. As principais lacunas identificadas referem-se ao fato de que países com maior volume de pesquisas apresentam maior avanço nas políticas de segurança de barragens e maior investimento tecnológico, enquanto o Brasil ainda se encontra em estágio menos desenvolvido nesse aspecto.

Introdução

As barragens constituem infraestruturas projetadas para alterar o curso natural de rios e arroios, possibilitando a formação de reservatórios. Esses reservatórios exercem múltiplas finalidades: garantem o suprimento de água à população e animais, sustentam sistemas de irrigação agrícola, viabilizam a produção de energia hidrelétrica para o atendimento da demanda energética e desempenham papel estratégico na mitigação e no controle de enchentes, assegurando a proteção de áreas urbanizadas e de zonas agrícolas frente aos impactos adversos das cheias (Marques, 2023).

Com um portfólio global de mais de 58.000 grandes barragens, conforme a Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD), as questões associadas à segurança de barragens e das comunidades a jusante estão se tornando cada vez mais relevantes, especialmente diante do envelhecimento das infraestruturas, do aumento das populações a jusante, das mudanças demográficas e das alterações nos padrões climáticos e meteorológicos. Estudos de Kondolf et al. (2022) indicam que os locais mais propícios para a implantação de novas barragens já foram amplamente explorados, o que reforça a necessidade de preservar os benefícios do armazenamento de água para usos múltiplos.

Na recente Declaração de Chengdu, publicada pela International Commission on Large Dams (ICOLD, 2025), reforça-se a urgência de construir e operar reservatórios de forma mais inteligente, segura e ambientalmente consciente, destacando a necessidade de ampliar a capacidade global de armazenamento de água. Frente ao agravamento de eventos extremos como enchentes e secas extraordinárias, e à crescente demanda por água e energia limpa. Sendo assim, torna-se fundamental aprimorar a manutenção e a operação dos reservatórios existentes, especialmente diante do envelhecimento estrutural das obras e das alterações nos regimes hidrológicos associadas às mudanças climáticas.

Compreender os impactos das mudanças climáticas, que intensificam a ocorrência de eventos extremos, como chuvas severas, tornou-se cada vez mais crucial para a segurança de barragens. Soma-se a isso a necessidade de avaliar os riscos associados a falhas sucessivas e complexas nessas estruturas. Nesse contexto, o principal objetivo desse estudo é fornecer uma base consistente de informações e referências sobre segurança de barragens e os efeitos dos extremos climáticos, destacando a relevância das modelagens hidrológicas e hidráulicas como ferramentas essenciais para a prevenção de acidentes e a proteção das comunidades localizadas a jusante.

Metodologia

As investigações desenvolvidas neste trabalho foram conduzidas como uma revisão sistemática, incorporando análise bibliométrica, buscando reunir e examinar as informações existentes acerca da modelagem hidrológica e hidráulica para criação de cenários de ondas de cheia e de ruptura em barragens, especialmente no contexto de eventos climáticos extremos. A escolha por este tipo de revisão foi motivada pela temática de segurança de barragens, que pode servir de suporte para futuros projetos, bem como para a gestão operacional e manutenção das estruturas já existentes, mediante a consolidação de pesquisas atuais relacionadas ao assunto, a fim de reconhecer padrões, lacunas e possíveis recomendações aplicáveis às modelagens em diferentes situações.

Com a finalidade de assegurar que todos os artigos e documentos de relevância, ou que pudessem influenciar as conclusões, fossem incluídos, o processo de busca iniciou-se pela definição de termos ou palavras-chave. Utilizou-se a técnica de Coocorrência e Coautoria, onde foram usados como critérios de seleção as publicações que contivessem o termo "dam failure" e "inundation área" ou "hydrological modeling". Essas palavras-chave foram inseridas de forma isolada, bem como em combinação por meio de operadores booleanos.

Na sequência, estabeleceram-se as estratégias de investigação e pesquisa, que contemplam a seleção das bases de dados e de outras fontes de consulta. Essas estratégias buscaram contemplar diferentes dimensões da segurança de barragens, englobando as múltiplas finalidades dessas estruturas, como irrigação ou contenção de cheias. Sendo assim, foi realizada uma pesquisa com delimitação temporal de agosto de 2015 a agosto de 2025, sendo empregado o banco de dados do Scopus e o programa VOSviewer em sua versão 1.6.20 para criação das redes.

Não foi imposta restrição quanto ao tipo de material analisado, de modo que foram considerados artigos científicos, livros, normas oficiais, legislações, documentos técnicos, dissertações, teses, entre outros trabalhos relacionados ao tema. Quanto à abrangência geográfica, por tratar-se de um tópico universal, o estudo englobou tanto dados brasileiros quanto referências internacionais. Com relação a modelagem, o foco da pesquisa limitou-se em softwares de modelagem hidrológica e hidráulica.

Para a pesquisa sistemática, foi consultada a biblioteca do USACE (United States Army Corps of Engineers), da ASDSO (Association of State Dam Safety Officials), do CBDB (Comitê Brasileiro de Barragens), bem como boletins da ICOLD (International Commission on Large Dams), CIGB (Comission Internationale des Grands Barrages) e CDA (Canadian Dam Association), todos com significativa influência nos critérios técnicos aplicados a projeto, manutenção e operação de barragens. Também foi utilizado nessa pesquisa, os relatórios desenvolvidos pela ANA (Agência Nacional de Águas) e pela SEMA/RS (Secretaria do Meio Ambiente) a fim de trazer o panorama do Brasil na temática de segurança de barragens.

A triagem dos materiais ocorreu a partir leitura de títulos e resumos, seguida da análise integral dos textos previamente selecionados. Todo o processo foi realizado manualmente, sem o uso de softwares auxiliares. Os parâmetros utilizados para a seleção dos trabalhos foram: o tipo de software de modelagem, o tipo de documento e a relevância temática. Quanto ao tipo de software, foram considerados estudos apenas sobre modelagem hidrológica e hidráulica em barragens, uma vez que o foco do trabalho é reunir referências específicas desse campo.

Já em relação ao tipo de documento, aplicou-se o mesmo critério definido para as estratégias de busca, abrangendo artigos científicos, livros, normas oficiais, legislações, documentos técnicos, dissertações, teses e demais publicações pertinentes. Sobre a relevância temática, foram incluídos estudos que tratassem da segurança de barragens em cenários de extremos climáticos ou que, no mínimo, apresentassem uma definição robusta e detalhada.

Os resultados da pesquisa foram organizados conforme os critérios de análise estabelecidos, apresentando os estudos selecionados, suas definições e a síntese dos principais modelos empregados. Assim, a partir da investigação realizada, a abordagem do tema será estruturada nos seguintes eixos: Conceitos de segurança de barragens; causas e processos que culminam no rompimento de barragens; eventos extremos e riscos hidrológicos associados, com ênfase em cenários no Rio Grande do Sul e modelagem de ondas de cheia e cenários de ruptura. Posteriormente, a análise crítica será direcionada aos seguintes pontos: Pesquisa bibliométrica e principais metodologias de modelagem encontradas.

Resultados e Discussão

Segurança de barragens: Conceitos e classificações

No âmbito global, a segurança de barragens constitui um tema de importância crescente, sobretudo diante de eventos recentes que evidenciam as fragilidades e vulnerabilidades dessas estruturas hidráulicas. O Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (USACE) define segurança de barragens como: "Processo contínuo que inclui: inspeções periódicas, monitoramento, avaliação de desempenho estrutural, manutenção, análise das consequências de inundações ou rupturas, planos de emergência e comunicação de risco".

O Bulletin 154 da ICOLD descreve que: "O objetivo fundamental da segurança de barragens é proteger as pessoas, a propriedade e o meio ambiente de efeitos danosos decorrentes do mau funcionamento ou falha de barragens e reservatórios". Ademais, de acordo com a ASDSO, a operação de barragens compreende um conjunto de ações e rotinas destinadas a assegurar que a barragem e seus sistemas associados funcionem de maneira eficiente. Isso envolve a atuação de dispositivos como válvulas e comportas, o acompanhamento constante das condições operacionais, como os níveis de água e as vazões, além da adoção de medidas preventivas que garantam a segurança dos profissionais e da população ao redor da estrutura.

No âmbito da gestão das águas no Brasil, sobressai a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei Federal nº 9.433/1997, que visa promover o uso sustentável e equilíbrio da água. Essa política se fundamenta na participação da sociedade, na preservação dos mananciais e na garantia de acesso equitativo à água de qualidade, sendo implementada em escalas estadual e regional por meio dos Comitês de Bacia Hidrográfica.

Por sua vez, a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei Federal nº 12.334/2010 e modificada pela Lei nº 14.066/2020, tem como objetivo assegurar a observância de padrões mínimos de segurança em barragens, com vistas à mitigação dos riscos de acidentes. A Lei estabelece a seguinte definição: "III - segurança de barragem: condição que vise a manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente".

Entre suas diretrizes, está a criação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), destinado à integração e à divulgação de dados sobre essas estruturas em âmbito nacional. Conforme o SNISB (2025), o Brasil possui mais de 30.000 barragens cadastradas e de acordo com o Relatório da ANA (2024-2025), 1.729 barragens no Brasil (28%)

possuem altura superior a 15 metros, sendo 30% (518 barragens) com usos principal para geração hidrelétrica e 27% (467) para abastecimento humano.

A Resolução CNRH nº 241, de setembro de 2024, publicada no Diário Oficial em outubro do mesmo ano, atualizou os critérios estabelecidos na Resolução CNRH nº 143, de 10 de julho de 2012. Já no âmbito da proteção e defesa civil, a Lei Federal nº 12.608 de 2012 e, mais recentemente, a Lei Federal nº 14.750/2023, atualizaram a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), fortalecendo a articulação entre entes federativos, ampliando a comunicação com comunidades vulneráveis e exigindo previsões orçamentárias específicas para ações preventivas e reativas. Destaca-se a importância do Plano de Contingência Municipal (PLANCON), instrumento fundamental para a resposta coordenada a eventuais crises e desastres.

Rompimento de barragens: Causas e processos

Conforme o Boletim 188 da ICOLD, publicado em 2019, as causas de rompimento de barragens podem variar desde as questões organizacionais ou ao comportamento humano, como insuficiência de projeto, insuficiência de construção, falta de manutenção ou vigilância e operação inadequada (incluindo comportas de vertedouro) até a causas relacionadas a fatores internos, que englobam questões técnicas, como problemas geotécnicos, problemas estruturais, envelhecimento dos materiais, diversos tipos de galgamento e a falha ou mau funcionamento de equipamentos hidromecânicos.

Uma falha é um acidente catastrófico caracterizado pela liberação não controlada da água armazenada e/ou a perda total da integridade da estrutura da barragem, de sua fundação ou de seus encontros. De acordo com o Boletim Técnico Tailings Dam Breach Analysis (TDBA), publicado em 2021 pela Canadian Dam Association (CDA), existem dois processos que podem levar a ruptura de barragens: Colapso e galgamento.

O colapso engloba situações como: Erosão interna (piping), que se manifesta pela remoção de partículas do solo na barragem ou em suas fundações, transportadas pelo fluxo de percolação até a jusante; Liquefação, processo pelo qual materiais sem coesão perdem sua resistência mecânica e passam a comportar-se como um líquido; e Instabilização, que ocorre quando a barragem perde sua estabilidade estrutural, podendo ser causada por movimentos de massa nos taludes de jusante ou montante em barragens de aterro, ou por tombamento, deslizamento ou flutuação em barragens de concreto.

Já o galgamento (overtopping) é caracterizado pelo transbordamento de água sobre a crista da barragem, podendo resultar em ruptura devido à instabilização ou erosão da estrutura. A instabilidade de um talude ocorre quando as tensões aplicadas no solo ou na rocha superam a resistência ao cisalhamento do material. A avaliação da estabilidade dos taludes é fundamental tanto na elaboração e execução de projetos de barragens quanto durante sua operação, podendo ser realizada por meio de métodos determinísticos ou probabilísticos (De Oliveira, 2023).

Sandroni et al. (2021) realizou um agrupamento de acidentes em barragens, dividindo por modos de ocorrência, como a percolação, instabilidade, erosão e outros. Foi constatado neste estudo que, percolação e galgamento, juntos, são responsáveis por 70% a 80% dos acidentes. Vale notar que esses dois modos são responsáveis por uma proporção ainda maior dos desastres. Os dados de desastres brasileiros apontam para uma porcentagem ainda mais elevada, da ordem de 90%.

A erosão interna constitui uma das principais causas de falhas em barragens e de incidentes que comprometem a segurança estrutural dessas infraestruturas hidráulicas (ICOLD, 2013), sendo que a maioria das falhas por piping ocorreu durante o primeiro enchimento. Entretanto, tais falhas também podem se manifestar após o primeiro enchimento, mantendo a erosão interna como uma ameaça contínua às barragens existentes.

De acordo com Fell et al. (2005), o modo de falha por erosão interna pode se manifestar de três maneiras: erosão interna através do corpo da barragem, geralmente associada a estruturas que atravessam a barragem; erosão interna na fundação; e erosão interna direcionada do corpo da barragem à fundação ou à interface com esta. Ademais, o processo de erosão interna (piping) pode ser segmentado em quatro etapas: a fase inicial de erosão, seguida da continuação do processo erosivo, depois a progressão até a formação de um canal de percolação (piping) e, por fim, a fase que leva ao início da ruptura da barragem.

São diversos os fatores de risco em barragens mais antigas, como a deterioração de elementos estruturais, como condutos e vertedouros, ocasionada pelo envelhecimento das construções e a deficiência na drenagem interna ou inadequação de filtros e zonas de transição, que podem não atender aos padrões modernos de projeto, tornando-os potencialmente ineficazes. Pesquisas compiladas e analisadas por Guidicini et al. (2021) indicam que, historicamente, o galgamento representa um dos modos de falha mais frequentes responsáveis pela ruptura de barragens em âmbito global. Entre esses estudos, sobressaem-se os dados referentes aos modos de ruptura de grandes barragens (altura superior a 15 metros), consolidados pelo ICOLD.

Compreender e correlacionar as causas e os diferentes tipos de acidentes em barragens é essencial para subsidiar estudos mais aprofundados e orientar inspeções com maior precisão e segurança. A detecção precoce de anomalias, como fissuras, trincas ou quaisquer inconsistências no corpo da barragem e em suas estruturas associadas, é decisiva para a prevenção de incidentes. Essa necessidade torna-se ainda mais crítica diante da ocorrência de eventos climáticos extremos, que podem intensificar esforços hidrodinâmicos e comprometer a integridade estrutural da barragem, aumentando significativamente o risco de falhas e rupturas.

Eventos climáticos extremos: Cenários no Rio Grande do Sul

Ao longo da história, os fenômenos climáticos extremos evidenciaram a relevância e a necessidade de desenvolvimento de projetos de engenharia adequados para estruturas de contenção d'água. Entre os exemplos mais significativos, destacam-se o furacão Katrina nos Estados Unidos em 2005, as inundações em Cairo, Illinois, os transbordamentos históricos na Holanda e o tsunami de 2011 no Japão. Mais recentemente, em 2024, assim como Valência na Espanha, o Brasil enfrentou as cheias no estado do Rio Grande do Sul, que testaram a resiliência das estruturas hidráulicas existentes.

Nos últimos anos, tem-se observado um aumento notável no número de rompimento de barragens em todo o mundo, destacando a importância da segurança dessas estruturas hidráulicas. De acordo com Armon et al. (2025), chuvas extremas, provavelmente associadas às mudanças climáticas, levaram ao enchimento e à ruptura de uma barragem localizada acima da cidade de Derna, na Líbia, em setembro de 2023. A cidade de Al-Bayda registrou 414 mm em 24 horas (Annunziato, et al. 2024). Grande parte da cidade foi destruída, com mais de 10.000 pessoas perdendo a vida. A barragem encontrava-se em condições técnicas gravemente deterioradas.

Pesquisas conduzidas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) indicam que fenômenos climáticos extremos tendem a se tornar cada vez mais recorrentes e intensos nos próximos anos (IPCC, 2021). Mudanças nos padrões de precipitação, aumento nas taxas de evaporação e derretimento de geleiras devem exacerbar a escassez de água em muitas regiões. O tempo, a duração e a intensidade das ocorrências da crise climática permanecem incertos.

O Relatório de Conjuntura da Agência Nacional de Águas (ANA, 2024) classifica o evento ocorrido entre abril e maio de 2024 no Rio Grande do Sul, como a maior catástrofe climática da história do Estado. De acordo com o Relatório, o evento foi impulsionado por uma combinação particular de condições meteorológicas. Conforme informações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), os principais fatores atmosféricos foram a formação de um bloqueio atmosférico no Oceano Pacífico, a atuação de uma massa de ar frio ao sul e a presença de uma massa intensa de ar quente e seco sobre o Brasil central, que impediu a progressão da frente fria para o sul. Esse bloqueio atmosférico prolongou a instabilidade e ocasionou a chuva volumosa e contínua sobre o Estado.

O evento hidrológico resultou no transbordamento de cursos d'água, no galgamento de diques e barragens, em danos à malha viária e em movimento de massa, afetando diversos municípios. Possantti et al. (2024) organizaram um banco de dados, no qual as áreas de inundação observadas em 6 de maio de 2024, abrangem os vales dos rios Taquari, Pardo e Caí, bem como a região hidrográfica do Guaíba. Diversos pluviômetros na região registraram valores máximos de precipitação em 24 horas bem acima de 300 mm (Collischonn, et al. 2024).

Conforme o Atlas de Vulnerabilidade a Inundações (ANA, 2014), 473 dos 1.392 trechos inundáveis dos cursos d'água do Estado do Rio Grande do Sul apresentam alta vulnerabilidade a inundações. Em consulta ao Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), observa-se que os reservatórios localizados na Bacia do Rio Jacuí registraram aportes excepcionais de água durante o evento climático extremo. Destaca-se, por exemplo, a barragem 14 de julho, que apresentou afluência superior a 11.000 m³/s e corroborou para o rompimento parcial da estrutura da barragem.

Modelagem hidrológica e hidráulica: Simulações de onda de cheia e de ruptura de barragens

Atualmente, para fundamentação dos estudos de ruptura de barragens, encontram-se disponíveis diversos modelos hidráulicos e hidrodinâmicos aplicados em simulações. De acordo com Ferla (2018), esses modelos permitem a estimativa do instante de formação da brecha, da evolução temporal do processo e da propagação subsequente da onda de cheia no vale a jusante em consequência da falha estrutural.

A realização das simulações requer a definição de diversos parâmetros. Na modelagem hidrológica é importante estabelecer relações entre os parâmetros e as características físicas da bacia, como o relevo, a pedologia, cobertura vegetal, sua geologia e a variabilidade do comportamento da bacia em relação aos possíveis usos do solo (Tucci, 2005). Já para a modelagem hidráulica, é importante a definição dos parâmetros geométricos da seção, além do coeficiente de rugosidade.

Após a obtenção do hidrograma de ruptura, é viável simular sua propagação de jusante da barragem. Dessa forma, é possível analisar detalhadamente os impactos da ruptura de uma estrutura específica, avaliando vazões, profundidades e áreas de inundação ao longo do vale a jusante, permitindo um melhor entendimento das regiões afetadas por esse fenômeno.

Estudos como os de Froehlich (2008) e Wahl (2004) destacam a importância de calibrar esses modelos com dados históricos e de batimetria ou Modelos Digitais de Terreno (MDT) atualizados e com a melhor resolução possível, visando aprimorar a precisão das simulações. A integração entre modelagem hidrológica e hidráulica permite avaliar a intensidade, o tempo de chegada e a extensão da inundação, fornecendo informações cruciais para o planejamento de ações emergenciais.

A modelagem da resposta hidrológica e hidráulica em cenários de ruptura de barragens é fundamental para prever a propagação da onda de cheia e seus impactos a jusante. O HEC-RAS e o HEC-HMS são softwares de modelagem desenvolvidos pelo Hydrologic Engineering Center (HEC) do U.S. Army Corps of Engineers (USACE) e que são amplamente utilizados na pesquisa acadêmica. Essas ferramentas gratuitas, são aplicadas de forma integrada, com o HEC-HMS fornecendo insumos essenciais ao HEC-RAS para a simulação do comportamento hidráulico subsequente e da inundação em cursos d'água (USACE, 2016).

O HEC-HMS é destinado à simulação de processos hidrológicos de precipitação-escoamento em escala de bacia hidrográfica. A simulação requer o cálculo da precipitação associada a um evento com período de retorno definido (100, 1.000 ou 10.000 anos), por meio da formulação da relação intensidade-duração-frequência (IDF). A avaliação demanda a aplicação do Hidrograma Sintético do Natural Resources Conservation Service (NRCS), a determinação do número de curva (CN) e a estimativa do tempo de concentração, com a possibilidade de utilização de diferentes metodologias para sua obtenção.

Já o HEC-RAS, introduzido em 1994, realiza modelagem hidráulica de rios e tubulações, abrangendo escoamentos permanentes e variáveis no tempo. Geralmente, efetua-se o cálculo das equações unidimensionais de Saint-Venant, em estado constante ou variável, em leito estático ou móvel. O software (USACE, 2016) permite ao usuário gerar a evolução da brecha de ruptura a partir de parâmetros geométricos previamente definidos para a abertura, com base no tempo estimado para a ocorrência da falha, calcular a vazão máxima associada ao evento, além de produzir o hidrograma correspondente e estimar sua duração total.

Diversos outros softwares de modelagem são utilizados para a realização da modelagem hidráulica e hidrológica, oferecendo uma variedade de ferramentas e módulos que permitem a análise detalhada de cenários de ruptura de barragens, desde a geração de hidrogramas de ruptura até a simulação da propagação das ondas de cheia em áreas a jusante. A escolha do software mais adequado depende das características específicas do estudo, como a complexidade do sistema hídrico, a disponibilidade de dados e os objetivos da análise.

Pesquisa bibliométrica

Sobre a análise bibliométrica do banco de dados da Scopus, resultaram elegíveis 99 publicações aos critérios indicados, vinculadas a 1.266 palavras-chaves contidas nestas publicações. Pela técnica da Coocorrência, optou-se por mapear somente as palavras-chaves que apareceram em 5 ou mais publicações, sendo que "dam failure" e "hydrological modeling", resultaram em 71 e 58 ocorrências, respectivamente. Já pela técnica da Coautoria, optou-se por mapear os países com mais publicações a respeito do tema central pesquisado. Após o mapeio, procedeu-se com a leitura dos resumos das publicações elegíveis para a escolha dos materiais mais correlatos com a pesquisa.

A Figura 01 ilustra a nuvem das principais palavras-chaves associadas ao tema central desta pesquisa, sendo que as arestas (linhas) representam como se relacionam entre si, a espessura das arestas indica a intensidade de cada relação e o tamanho dos nós (bolas), retrata a frequência de ocorrência das palavras-chave.

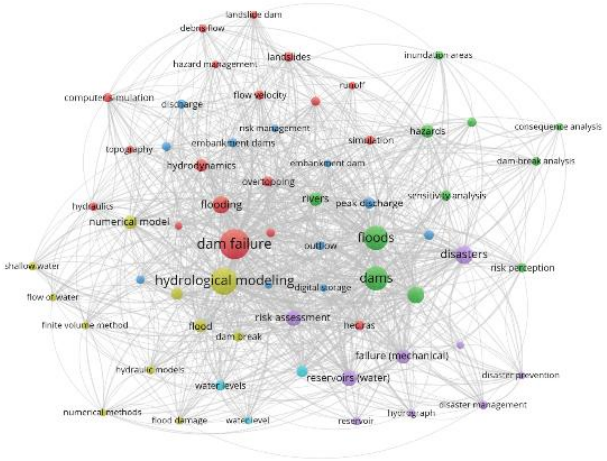


Figura 01: Principais palavras-chaves associadas ao tema central da pesquisa.
Fonte: A Autora (2025)

Os países com maior quantidade de publicações relativas ao tema central foram os Estados Unidos e China, aparecendo com os nomes maiores e mais centrais, pois possuem o maior volume de artigos publicados sobre o tema. O apoio estatístico propiciado por esta análise de frequência dos termos e países de origem das publicações trouxe melhor visibilidade da amplitude do campo de pesquisa global, dos relacionamentos ou conexões entre os elementos analisados, permitindo através da identificação de tendências, que os tópicos integrantes deste trabalho pudessem ser melhor selecionados e abordados com mais eficácia e relevância.

Principais metodologias de modelagem encontradas

Os modelos hidrológicos e hidráulicos/hidrodinâmicos possuem finalidades distintas, embora complementares, dentro do processo de simulação de eventos extremos e de ruptura de barragens. Em síntese, a integração entre ambos os tipos de modelos é fundamental para representar adequadamente todo o processo físico envolvido em um evento extremo: desde a geração da vazão até a propagação e inundação resultante. Essa abordagem integrada é especialmente relevante em estudos de ruptura hipotética de barragens, nos quais a precisão dos resultados depende diretamente da coerência entre os modelos.

As Tabelas 01 e 02 a seguir, apresentam uma síntese dos principais modelos hidrológicos e hidráulicos encontrados na pesquisa, utilizados em estudos de cheia e ruptura de barragens, destacando seu foco principal, aplicações e disponibilidade.

Tabela 01: Softwares de modelagem hidrológica mais comuns encontrados na pesquisa em tela.

Software	**Foco Principal**	**Aplicações em Ruptura de Barragens**	**Disponibilidade / Referência**
HEC-HMS	Processos chuva–vazão	Geração de hidrogramas de entrada para modelagem de ruptura	Gratuito (USACE, 2016)
MOHID Land	Processos hidrológicos em bacias hidrográficas	Simulação de escoamento superficial e qualidade da água	Código aberto (Universidade de Lisboa, 2021)

MS-ANA 2.1 (ANA)	Estimativa de manchas de inundação	Modelagem simplificada para Planos de Contingência e PAE	Gratuito (ANA, 2023)
SWAT (Soil and Water Assessment Tool)	Modelagem integrada de bacias hidrográficas em longo prazo	Simulação de regimes hidrológicos contínuos e cenários de uso do solo para avaliação de segurança e operação de barragens	Código aberto (USDA, 2012)
LASH (Lavras Simulation of Hydrology)	Processos hidrológicos em escala de bacia e séries temporais extensas	Simulação de balanço hídrico e previsão de vazões para cenários de operação e ruptura	Código aberto (BESKOW, 2009)
LISEM (Limburg Soil Erosion Model)	Escoamento superficial e erosão do solo	Modelagem de resposta hidrológica e erosão em eventos extremos, aplicável à estabilidade de barragens	Código aberto (De Roo et al., 1996)

Tabela 02: Softwares de modelagem hidráulica mais comuns encontrados na pesquisa em tela.

Software	**Tipo**	**Foco Principal**	**Aplicações em Ruptura de Barragens**	**Disponibilidade / Referência**
HEC-RAS	1D/2D	Modelagem hidráulica de rios e canais	Simulação de falhas em barragens, propagação de ondas e mapeamento de inundações	Gratuito (USACE, 2016)
MIKE 11	1D	Escoamento em rios e canais	Simulação de ruptura e previsão de cheias	Comercial (DHI, 2023)
MIKE 21	2D	Escoamento em superfícies planas	Propagação bidimensional de ondas de cheia e inundações urbanas	Comercial (DHI, 2023)
MIKE FLOOD	1D/2D	Integração dos módulos MIKE 11 e MIKE 21	Simulação acoplada de ruptura e inundação	Comercial (DHI, 2023)
DAMBRK	1D	Ruptura de barragens (modelo clássico do USACE)	Simulação do hidrograma de ruptura e propagação da onda	Gratuito (USACE, 1980)
FLDWAV	1D	Hidráulica e falhas de barragens	Evolução do DAMBRK; simulação de ruptura com escoamento não permanente	Gratuito (USACE, 1998)
GeoClaw	2D	Modelagem de ondas de cheia e tsunamis	Simulação de falhas catastróficas e propagação de ondas	Código aberto (Spero, 2022)
DAMBREAK Model (ANA)	1D	Simulação de ruptura de barragens	Avaliação de impactos e mapeamento de inundações	Gratuito (uso restrito) (ANA, 2024)
LISFLOOD-FP	2D	Propagação de cheias em planícies de inundação	Simulação de ruptura de barragens e ondas de cheia	Código aberto (Bates, 2010)
RiverFlow2D	2D	Hidráulica de rios e áreas inundáveis	Simulação de ruptura de barragens e propagação de inundações	Comercial (Hydronia, 2020)

No que se refere a influência da escolha do modelo hidrológico ou hidráulico nas avaliações de impacto climático, estudos comparativos têm analisado o desempenho de diferentes modelos a fim de verificar sua sensibilidade às mudanças climáticas projetadas. Nesse contexto, Coron et al. (2012) realizaram um experimento de 216 bacias hidrográficas australianas, submetendo modelos hidrológicos a condições climáticas contrastantes para avaliar sua robustez e limitações. Foi constatado que nenhum modelo individual supera o desempenho de conjunto multi-modelos.

Modelos específicos para simulação do processo de formação de brecha em barragens, como o BREACH (Fread, 1991), RUPRO (Paquier et al. 2005) e DEICH-P (Broich, 2005) representam ferramentas fundamentais para compreender a dinâmica de erosão progressiva em estruturas de terra. Além desses, também existem os modelos tridimensionais mais avançados, capazes de representar com maior realismo o comportamento hidrodinâmico e morfológico durante o processo de ruptura. Uma descrição mais detalhada dessas abordagens, bem como a comparação entre métodos de cálculo e limitações de aplicação, pode ser consultada em Saliba, 2009.

No contexto da simulação de ruptura de barragens, o GeoStudio (GeoSlope International, 2023) é frequentemente utilizado em conjunto com modelos hidráulicos. O programa contribui para a caracterização da ruptura propriamente dita, por

meio da avaliação da estabilidade do maciço, do processo de erosão interna (piping) e do escoamento através da estrutura. Assim, o software oferece análise acoplada entre estabilidade geotécnica e hidrodinâmica, essencial para a elaboração de cenários de falha hipotética e estudos de segurança de barragens.

Por fim, softwares que realizam análise de riscos e pós processamento de inundações também estão disponíveis, como descrito em United States (2011), que implementaram os procedimentos LIFESim, que são utilizados para estimar a perda de vidas relacionada a inundações. Essas metodologias são utilizadas por meio de duas ferramentas distintas: LIFESim Modeling System e HEC-FIA (Hydrologic Center – Flood Impact Analysis).

Comentários finais

A magnitude dos eventos de precipitação associados a extremos climáticos evidencia a necessidade de alerta quanto à possível subestimação dos eventos extremos hipotéticos utilizados no dimensionamento de grandes obras de infraestrutura, como barragens. Nesse contexto, a modelagem hidrológica e hidráulica assume papel fundamental como ferramenta preventiva, pois permite simular cenários críticos e antecipar comportamentos diante de eventos extremos.

Diante dessa realidade, Paiva et al. (2024) realizou um estudo estabelecendo diretrizes para a consideração de modificações no balanço hídrico e na disponibilidade de água, abrangendo variações na precipitação, evapotranspiração e vazões médias, bem como critérios para a avaliação de eventos extremos, incluindo chuvas intensas, vazões máximas associadas a cheias, indicadores de estiagem e vazões mínimas. Tais critérios constituem subsídios técnicos relevantes para análises hidrológicas aplicadas ao planejamento, dimensionamento, operação e avaliação de segurança de barragens, especialmente no que se refere à estimativa de cheias de projeto e à análise de desempenho frente a cenários climáticos futuros.

Foram apresentadas distintas realidades e modelos de gestão, acompanhados de um conjunto de opções e diretrizes que podem subsidiar pesquisadores, órgãos fiscalizadores e empresas do setor na utilização e emprego da modelagem como ferramenta de aperfeiçoamento de políticas e práticas de segurança de barragens.

Ressalta-se, ainda, a importância da previsão de enchentes decorrentes de rupturas através da utilização de modelos de simulação computacional de rompimento de barragem, estes, se demonstram ferramentas relevantes para auxiliar na prevenção de acidentes, jamais substituindo a inspeção humana de técnicos habilitados e experientes. Os resultados reforçam a relevância da implementação de medidas de liberação controlada de água e da adequada preparação dos reservatórios, garantindo a mitigação de riscos em situações de armazenamento e contribuindo para a segurança das barragens.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer o Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia Hídrica da Universidade Federal de Itajubá pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Relatório de Segurança de Barragens 2023. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/cnrh/reunioes-e-eventos/reunioes-do-cnrh/plenarias/7-1-anexo_ana_relatorio-barragens-2023_compressed.pdf. Acesso em: 23 set. 2025.

ANNUNZIATO, A.; SANTINI, M.; PROIETTI.; DE GIROLAMO, L.; LORINI, V.; GERHARDINGER, A.; TUCCI, M. Modelling and Validation of the Derna Dam Break Event: **GeoHazards**, v. 5, n. 2, p. 504-529, 2024.

ARMON, M.; SCHMILOVITZ, Y.; DENTE, E. Anatomy of a foreseeable disaster: Lessons from the 2023 dam-breaching flood in Derna, Libya: **Science Advances**, v. 10, n. 13, 2025.

BATES, P, D.; HORRIT, M, S.; FEWTRELL.; A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling: **Journal of Hydrology**, v. 387, n. 2, p. 33-45, 2010.

BESKOW, S. **LASH Model: a hydrological simulation tool in GIS framework.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2009.

CDA – CANADIAN DAM ASSOCIATION.EN. Tailings Dam Breach Analysis Technical Bulletin. 2021. Disponível em: https://cda.ca/publications/cda-guidance-documents. Acesso em: 20 out. 2025.

COLLISCHONN, W.; FILHO, R, C.; RAMALHO, N, V.; RUHOFF, A.; PAIVA, R.; FAN, F.; BRÊDA, J, P, L, F.; WONGCHUIG, S. Unprecedented April-May 2024 rainfall in South Brazil sets new record: **Brazilian Journal of Water Resources**, vol 29, n. 50, 2024.

CORON, L.; ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.; LERAT, J.; VAZE, J.; BOURQUI, M.; HENDRICKX, F. Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments: **Water Resources Research**, vol 48, n. 5, 2012.

DE OLIVEIRA, M, A, M. **Comparação entre os métodos de equilíbrio limite e elementos finitos para análise de estabilidade de taludes**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. **Geotechnical Engineering of Dams**. 1 ed. London, UK: Taylor & Francis Group, 2005.

FERLA, R. **Metodologia simplificada para análise de aspectos hidráulicos em rompimento de barragens**. 2018. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

FROEHLICH, D. C. Embankment dam breach parameters: Results of the EPRI workshop. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 134, n. 10, p. 1445–1461, 2008.

GUIDICINI, G.; SANDRONI, S. S.; DE MELLO, F. M. **Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragens e obras anexas no Brasil**. 1 ed. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2021.

KONDOLF, M.; YI, J. Dam Renovation to Prolong Reservoir Life and Mitigate Dam Impacts. **Water**, v. 14, n. 9, 1464, 2022.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Statistical analysis of dam failures. (Bulletin 188). 2019. Disponível em: https://www.icold-cigb.org/gb/publications/bulletins.asp. Acesso em: 20 out. 2025.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Dam Safety Management: Operational Phase of the Dam Life Cycle. (Bulletin 154). 2017. Disponível em: https://www.icold-cigb.org/gb/publications/bulletins.asp. Acesso em: 20 out. 2025.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Chengdu Declaration on Dams and Reservoirs for Energy transition and Adaptation to Climate Change. 2025. Disponível em: https://cnpgb.apambiente.pt/sites/default/files/documentos/World%20Declaration%20on%20Dam%20Safety_ICOLD_A3.pdf. Acesso em: 20 out. 2025.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** 1 ed. Cambrigde, United Kingdon and New York (USA): Cambridge University Press, 2021.

MARQUES, E. **Segurança em barragens de terra: orientações gerais e práticas recomendadas.** 1 ed. Curitiba: Appris Editora, 2023.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; MIRANDA, P. T.; PETRY, I.; DORNELLES, F.; GOLDENFUM, J.; FAN, F.; RUHOFF, A.; FAGUNDES, H. **Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: Chuvas e cheias extremas na Região Sul do Brasil**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

SALIBA, A, P, M. **Uma nova abordagem para análise de ruptura por galgamento de barragens homogêneas de solo compactado.** 2009. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SANDRONI, S. S.; GUIDICINI, G. **Barragens de terra e enrocamento**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 678 p, 2005.

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual Version 5.0. 2016. Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs. Acesso em: 20 out. 2025.

WAHL, T. L. Uncertainty of Predictions of Embankment Dam Breach Parameters. **Journal of Hydraulic Engineering**. Denver, USA, v. 130, n. 5, 389-397, 2004.

SPATIAL INTERPOLATION FOR MUNICIPALITY-SCALE TEMPERATURE ESTIMATION IN SÃO PAULO: CHALLENGES IN REPRESENTING EXTREME VALUES

1 Fabiano Fernandes Bargos, 2 Danúbia Caporusso Bargos
1 Escola de Engenharia de Lorena- Universidade de São Paulo (EEL/USP),fabianobargos@usp.br;
2 Escola de Engenharia de Lorena- Universidade de São Paulo (EEL/USP,danubiacbargos@usp.br

Palavras-chave: Climate data processing; Geospatial temperature estimation; Data-sparse modeling.

Abstract

Climate variability and extreme events create challenges for environmental assessment and territorial planning, particularly in regions with heterogeneous meteorological station coverage. This study presents a reproducible framework to transform hourly station observations into municipality-level climate time series and indicators for the state of São Paulo, Brazil. Hourly temperature data from INMET stations were processed through a pipeline including quality control, spatial interpolation, and temporal aggregation. Interpolation performance was evaluated using leave-one-out cross-validation, comparing a nearest-neighbor (NN) baseline with several inverse distance weighting (IDW) configurations using search radii of 150–250 km and distance-decay exponents $\alpha = 2$ and $\alpha = 3$. All IDW configurations outperformed the NN baseline, which produced the highest error (RMSE = 2.652 °C) and the lowest explanatory power ($R^2 = 0.778$). The best performance was achieved with the configuration (R, α) = (250 km, 2), achieving RMSE = 1.973 °C and $R^2 = 0.877$, with negligible bias. Interpolation accuracy varied spatially, with larger errors observed in coastal and mountainous regions where strong environmental gradients occur.

The interpolated dataset enables the analysis of temperature variability at the municipal scale. Differences between interpolation methods can be substantial for extreme values, with maximum discrepancies exceeding 11 °C in some municipalities due to strong spatial contrasts among nearby stations.

Introduction

Climate variability, coupled with the increasing frequency and intensity of extreme events, has heightened the demand for environmental information capable of supporting the formulation of public policies aimed at climate change adaptation and mitigation. As highlighted by IPCC (2021), temperature extremes have become more frequent and intense, with direct impacts on public health, urban infrastructure, and water resource availability. In this context, the proper characterization of extreme events, such as heatwaves, depends on the availability of spatially consistent climate data that are representative at the local scale, particularly at the municipal level, where a significant portion of planning and management actions is implemented.

In Brazil, this demand is constrained by structural limitations in monitoring systems. Meteorological observations, largely derived from the network operated by the Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), exhibit uneven spatial distribution and often present temporal gaps associated with operational failures. These constraints limit the ability to detect and analyze climate extremes, which require continuous time series and adequate spatial representativeness. The challenge becomes even more pronounced in regions with high environmental heterogeneity.

The state of São Paulo exemplifies this issue due to the diversity of its physical-geographical characteristics, including coastal areas, mountain ranges such as the Serra do Mar and the Serra da Mantiqueira, and extensive inland plateaus. This configuration promotes the occurrence of strong thermal gradients, influenced by factors such as elevation, proximity to the ocean, and regional atmospheric circulation. Studies by Monteiro (1973) and Conti (2005) indicate that such variations may occur over relatively short spatial scales, limiting the representativeness of point-based observations and posing additional challenges for the analysis of extreme events.

In this context, spatial interpolation techniques have been widely used to transform point observations into continuous surfaces. Methods such as inverse distance weighting (IDW) are frequently adopted due to their simplicity and computational efficiency (Shepard, 1968), although their performance strongly depends on parameter settings and station distribution (Li & Heap, 2008; Hofstra et al., 2012). Recent evidence shows that, in regions with complex terrain, interpolation performance can vary significantly, being sensitive to both environmental conditions and methodological choices (Jiang et al., 2026). Furthermore, uncertainties associated with interpolation may substantially affect the representation of climate extremes, often leading to the smoothing of temperature peaks and the underestimation of extreme events (Hofstra et al., 2008; New et al., 2002). This issue is particularly critical for heatwave analysis, as their identification depends on the preservation of extreme values in time series. Additionally, many available climate products are not structured according to administrative units, limiting their direct application in municipal planning.

Within this framework, this study proposes a reproducible approach for generating municipality-scale temperature time series for the state of São Paulo, based on hourly INMET data (2021–2025). Different IDW configurations are evaluated and compared with the nearest neighbor method using cross-validation procedures. By examining how interpolation methods influence the representation of thermal variability—and, in particular, extreme values—this study aims to contribute to the development of climate datasets better suited for extreme event analysis and for supporting public policy-making at the local scale.

Study Area, Data, and Methods

The state of São Paulo is located in southeastern Brazil and comprises 645 municipalities over an area of approximately 248,219 km² (Figure 01). It borders the states of Minas Gerais, Rio de Janeiro, Paraná, and Mato Grosso do Sul and is bounded to the east by the Atlantic Ocean. The combination of its territorial extent and diverse natural conditions results in pronounced environmental heterogeneity, reflected in both its relief and climate patterns.

From a geomorphological perspective, the territory exhibits significant morphostructural diversity associated with the interaction between crystalline basement structures and sedimentary basins shaped by long-term denudation processes. According to Ab'Sáber (1969), the state encompasses units of the Atlantic Plateau and the Peripheral Depression, characterized by dissected surfaces and structural escarpments. In this context, the Serra do Mar and the Serra da Mantiqueira stand out as prominent topographic barriers, contrasting with lower-elevation inland areas. The classification proposed by Ross (1996) complements this framework by identifying the presence of plateaus, tablelands, and basaltic cuestas, which give the relief a stepped configuration.

The climate is predominantly tropical, with variations associated with altitude. The Serra do Mar plays a key role in rainfall distribution, acting as an orographic barrier that enhances precipitation along the coast and in mountainous areas (Ab'Sáber, 1977). Spatial temperature variability largely reflects the combined effects of maritime and continental influences: coastal areas tend to exhibit lower thermal amplitude, while inland regions experience higher temperatures and greater variability.

With a population exceeding 44 million inhabitants and a high level of urbanization, the state exhibits strong socio-spatial dynamics and concentrates major urban agglomerations (IBGE, 2022). This context underscores the importance of climate analyses at the municipal scale, particularly in light of the increasing occurrence of extreme events such as heatwaves, whose impacts are strongly conditioned by local territorial characteristics.

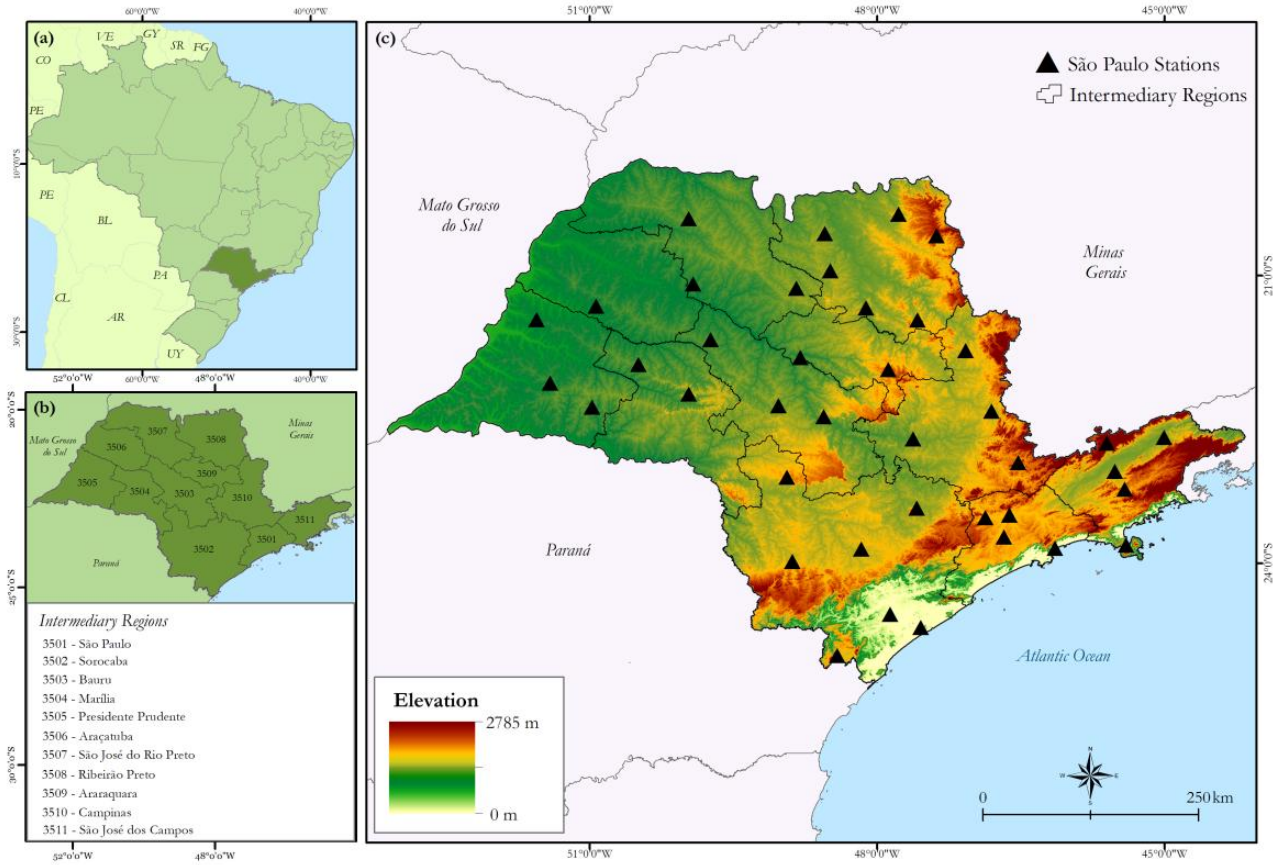


Figure 01: Study area overview. (a) Location of São Paulo state in Brazil. (b) Intermediate Geographic Regions (IBGE) in and around São Paulo. (c) Regional elevation map showing meteorological stations (triangles) and intermediate region centroids (squares).

Data Source

Hourly meteorological observations were obtained from the automatic weather station network operated by the Brazilian National Institute of Meteorology (INMET). Annual compressed files containing station-level CSV records were downloaded and processed. Each file includes station metadata (geographic coordinates, altitude, and operational information) followed by hourly measurements of meteorological variables.

In this study, air temperature observations were analyzed for the period from January 2021 to December 2025. Data completeness varies among stations due to operational interruptions and missing records, requiring systematic preprocessing procedures before analysis (Table 01).

To reduce interpolation artifacts associated with edge effects, a spatial buffer with a radius of 250 km around the boundaries of São Paulo State was included. This approach allows interpolation procedures to incorporate nearby stations located outside the state boundaries, improving spatial support near the edges of the study domain. Consequently, temperature data were collected from stations located both within São Paulo and in surrounding regions.

						Missing Data %				
ID	Station	Lat	Lon	Alt	Foundation	2021	2022	2023	2024	2025
A701	São Paulo - Mirante	-23.4963	-46.6201	785.6	25/07/06	0.0	0.0	2.4	0.2	0.5
A705	Bauru	-22.3581	-49.0289	636.2	30/08/01	1.2	12.5	0.0	0.0	0.1
A706	Campos do Jordão	-22.7503	-45.6039	1663.0	13/03/02	7.4	12.7	0.7	0.1	0.1
A707	Presidente Prudente	-22.1199	-51.4086	431.9	04/02/03	0.4	16.4	0.1	2.4	0.5
A708	Franca	-20.5844	-47.3825	1002.7	12/12/02	0.6	0.6	0.1	50.0	48.8
A711	São Carlos	-21.9804	-47.8839	859.3	04/09/06	0.1	12.8	0.1	17.9	19.2
A712	Iguape	-24.6717	-47.5459	2.7	20/07/06	52.7	24.0	0.0	0.3	0.0
A713	Sorocaba/Iperó	-23.4261	-47.5856	609.3	22/08/06	55.1	34.6	0.0	0.0	54.9
A714	Itapeva	-23.9819	-48.8858	743.3	25/07/06	7.7	11.0	0.0	0.0	11.2
A715	São Miguel Arcanjo	-23.8519	-48.1647	675.7	15/08/06	30.5	39.1	26.8	46.5	0.2
A716	Ourinhos	-22.9490	-49.8946	443.5	29/08/06	100.0	-	37.8	11.1	0.1
A718	Rancharia	-22.3728	-50.9747	398.8	01/09/06	21.7	32.3	0.0	0.0	0.3
A725	Avaré	-23.1017	-48.9411	776.4	22/09/06	91.0	32.6	1.2	15.3	28.7
A726	Piracicaba	-22.7031	-47.6233	566.5	26/09/06	100.0	19.1	0.0	10.9	26.1
A727	Lins	-21.6661	-49.7347	460.6	20/09/06	64.9	31.7	0.0	18.0	35.1
A728	Taubate	-23.0417	-45.5208	582.3	20/12/06	84.5	4.5	0.0	27.2	0.8
A729	Votuporanga	-20.4032	-49.9660	510.4	04/12/06	1.8	-	-	-	-
A733	Jales	-20.1650	-50.5950	460.4	22/08/07	57.7	41.1	30.5	8.3	0.2
A734	Valparaíso	-21.3192	-50.9303	381.9	30/08/07	13.4	36.3	2.1	0.0	0.1
A735	Jose Bonifácio	-21.0857	-49.9204	408.4	03/09/07	90.4	6.6	37.9	87.5	27.8
A736	Ariranha	-21.1331	-48.8406	525.4	13/11/07	66.6	46.7	0.0	0.0	4.6
A737	Ibitinga	-21.8556	-48.7997	496.8	09/11/07	33.5	3.9	0.0	36.7	28.0
A738	Casa Branca	-21.7806	-47.0753	734.1	25/06/07	100.0	2.1	0.0	7.8	12.8
A739	Itapira	-22.4151	-46.8053	634.9	05/11/07	100.0	34.2	3.9	8.2	5.7
A740	Sao Luís do Paraitinga	-23.2283	-45.4169	862.3	01/11/07	82.9	15.0	16.7	24.1	33.7
A741	Barra Bonita	-22.4711	-48.5575	533.7	24/04/08	64.0	20.5	0.0	0.1	0.2
A744	Bragança Paulista	-22.9519	-46.5306	891.0	20/12/17	14.1	14.3	3.3	3.2	1.6
A746	Barra do Turvo	-24.9628	-48.4164	659.9	03/07/08	100.0	25.0	0.0	0.1	12.7
A747	Pradópolis	-21.3383	-48.1139	540.4	22/04/08	0.0	0.0	0.0	2.2	0.1
A748	Barretos	-20.5592	-48.5450	534.4	19/06/10	22.5	53.0	4.4	39.6	27.4
A753	Ituverava	-20.3597	-47.7753	610.6	17/07/08	57.6	15.2	0.1	0.2	1.3
A755	Barueri	-23.5239	-46.8694	776.5	29/03/11	0.2	6.5	4.6	8.7	1.0
A762	Dracena	-21.4577	-51.5523	720.0	03/11/16	16.5	0.3	0.0	39.8	23.1
A763	Marília	-22.2352	-49.9651	660.0	15/05/17	0.0	0.0	1.3	0.4	0.2
A764	Bebedouro	-20.9492	-48.4900	790.0	27/10/16	51.0	18.6	0.9	-	4.7
A765	Bertioga	-23.8447	-46.1433	5.0	01/02/17	73.5	16.2	0.1	0.2	0.2
A766	Registro	-24.5331	-47.8642	35.0	09/02/17	78.3	18.4	2.0	19.8	92.5
A767	São Sebastião	-23.8108	-45.4025	24.0	25/10/17	98.6	-	-	-	-
A768	Tupa	-21.9273	-50.4903	498.0	12/05/17	4.1	9.9	4.9	4.3	3.9
A769	Cachoeira Paulista	-22.6889	-45.0056	586.0	20/10/17	100.0	13.1	1.9	3.7	41.8
A770	São Simão	-21.4611	-47.5794	620.0	03/07/19	1.4	1.4	2.8	3.7	2.1
A771	São Paulo - Interlagos	-23.7245	-46.6775	771.0	14/03/18	0.0	0.0	1.9	11.2	0.3

Table 01: Meteorological stations used in this study, including location (latitude, longitude, and altitude), foundation date, and the percentage of missing temperature observations for each year between 2021 and 2025.

Methodological Framework

The methodological workflow consists of three steps: (i) evaluation of spatial interpolation performance using cross-validation at meteorological stations, (ii) interpolation of hourly temperature observations to municipality centroids, and (iii) aggregation of the interpolated series to produce daily climate indicators.

Interpolation parameters were evaluated using a leave-one-out cross-validation (LOOCV) procedure applied to hourly station observations. In this approach, each station is temporarily removed from the dataset, and its temperature is estimated using the remaining stations. The interpolated value is then compared with the observed measurement. Repeating this process for all stations allows the systematic assessment of interpolation errors across the study region.

For the station-level analysis, we used the Nearest Neighbor (NN) method as a baseline reference and tested several configurations of the Inverse Distance Weighting (IDW) method. The evaluated configurations considered search radii of 150, 200, and 250 km and distance-decay exponents α = 2 and α = 3. Because IDW relies solely on spatial distance between stations, it does not explicitly account for geographic factors such as elevation or coastal influences, which may reduce accuracy in regions with strong environmental gradients.

Finally, hourly temperature observations were interpolated to the centroids of the 645 municipalities of São Paulo state using the six IDW configurations and the NN approach. The resulting municipality-level hourly series were aggregated into daily indicators.

Spatial Interpolation

Spatial temperature interpolation was performed using the Inverse Distance Weighting (IDW) method, which estimates values at unsampled locations as a distance-weighted average of nearby observations.
The interpolated value Z(x) at location x is defined as:

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^{n} Z_i w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}, \quad (01)$$

with Z_i the temperature observed at station i and w_i the corresponding weight. Weights were computed as:

$$w_i = \begin{cases} d(x,x_i)^{-\alpha}, & d(x,x_i) \le R_{max}, \\ 0, & d(x,x_i) > R_{max}, \end{cases} \quad (02)$$

with $d(x,x_i)$ the distance between the interpolation point and station i, α controls the distance decay, and R_{max} defines the maximum search radius.

Interpolation Evaluation

Interpolation accuracy was assessed using the leave-one-out cross-validation procedure described above. Interpolated values ($\hat{y}_t$) were compared with observed temperatures (y_t) using standard accuracy metrics. Let T denote the number of observations.
Root Mean Square Error (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}(\hat{y}_t - y_t)^2}. \quad (03)$$

Coefficient of Determination (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}(y_t - \hat{y}_t)^2}{\sum_{t=1}^{T}(y_t - \bar{y})^2}. \quad (04)$$

Bias

$$Bias = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}(\hat{y}_t - y_t). \quad (05)$$

Temporal Aggregation

After spatial interpolation, the hourly temperature series at municipality centroids were aggregated into daily indicators. Specifically, daily mean, minimum, and maximum temperatures were computed for each municipality. These aggregated indicators allow the assessment of spatial variability and provide a basis for evaluating how interpolation influences the representation of daily temperature statistics and extreme values.

Results

Table 02 summarizes the performance of the spatial interpolation configurations evaluated through cross-validation at meteorological stations. Overall, all IDW variants outperformed the nearest-neighbor baseline, which exhibited the highest error (RMSE = 2.652°C) and the lowest explanatory power (R^2 = 0.778). Incorporating distance-based weighting and a finite search radius consistently improved interpolation accuracy across all evaluated metrics.

		α = 2			α = 3		
	NN	R = 150	R = 200	R = 250	R = 150	R = 200	R = 250
RMSE	2.652	2.016	1.976	1.973	2.071	2.038	2.027
R^2	0.778	0.872	0.877	0.877	0.865	0.869	0.870
Bias	-0.090	-0.136	-0.146	-0.165	-0.127	-0.136	-0.149

Table 02: Performance of the IDW configurations evaluated in the study. The table reports the Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), coefficient of determination (R^2), and Bias for the nearest-neighbor baseline and for each combination of search radius R (km) and distance-decay exponent α. Lower RMSE and MAE and higher R^2 indicate better interpolation accuracy.

Among the IDW configurations, performance improved as the search radius increased for a fixed exponent α, with the best results obtained for the largest search windows. For α = 2, the RMSE decreased from 2.016 °C (R = 150 km) to 1.973 °C (R = 250 km). A similar pattern was observed for α = 3, although the improvements were slightly smaller. These results indicate that including a broader set of surrounding stations enhances spatial support and reduces local interpolation noise.

For a fixed radius, α = 2 systematically outperformed α = 3. Lower values of α promote smoother distance decay and distribute influence among a larger set of neighbors. The highest overall accuracy was achieved by the configuration (R, α) = (250 km, 2), yielding RMSE = 1.973 °C and R^2 = 0.877. Bias values were small for all methods (|Bias| < 0.17 °C), indicating the absence of systematic over or underestimation.

Figure 02 shows the spatial distribution of the meteorological stations across the Intermediate Geographic Regions defined by IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estat´ıstica). Table 03 reports the interpolation accuracy metrics for individual INMET stations, sorted by RMSE, comparing the NN method with the IDW configuration (R = 250 km, α = 2). Overall, the IDW configuration (R, α) = (250 km, 2) outperforms the NN method for most stations. RMSE values are generally lower under IDW, indicating more accurate interpolated values, while Bias values tend to move closer to zero, suggesting reduced systematic over or underestimation. For instance, Campos do Jordão (A706) shows a reduction in RMSE from 5.56 °C to 4.60 °C, while Bragança Paulista (A744) decreases substantially from 5.39 °C to 1.79 °C. Similarly, stations such as Presidente Prudente (A707) show strong improvement, with RMSE decreasing from 3.73 °C to 1.88 °C.

The R^2 also reflects improved explanatory power for many stations when using IDW. In several cases, stations with relatively low or moderate R^2 under NN show noticeable increases under the IDW configuration, indicating a better representation of spatial temperature variability.

When analyzing results by Intermediate Geographic Region, regions with more complex geographic characteristics, such as São José dos Campos, may still exhibit higher interpolation errors under both methods, although IDW generally reduces these errors compared to NN.

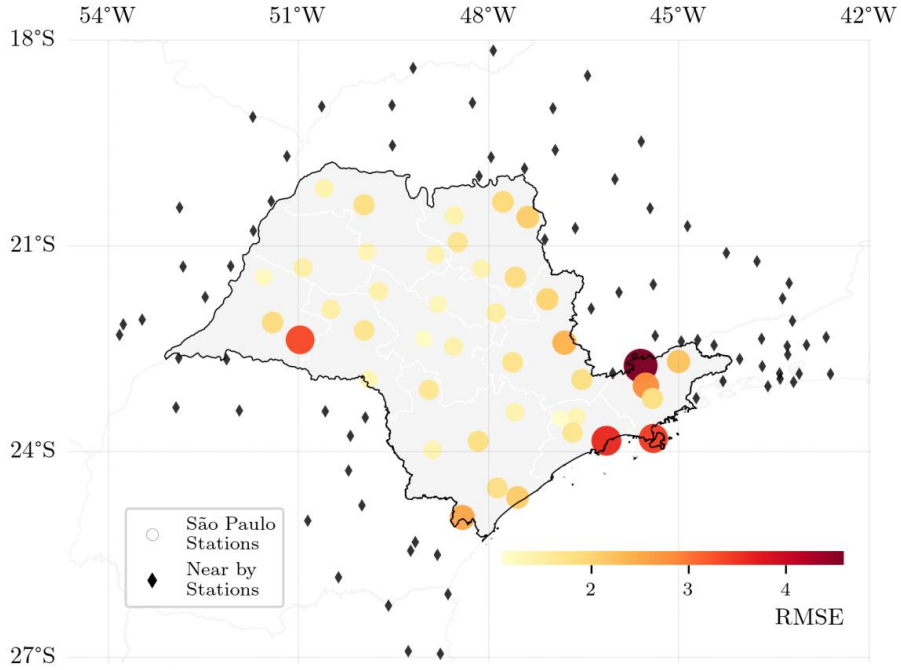


Figure 02: Spatial distribution of RMSE obtained with the IDW configuration (R, α) = (250 km, 2) for INMET meteorological stations in São Paulo state. The map highlights regional differences in interpolation accuracy, with larger errors occurring mainly in coastal and mountainous areas and lower errors across the interior plateau.

			RMSE		R^2		Bias	
Station		Region	NN	(250,2)	NN	(250,2)	NN	(250,2)
A706	Campos do Jordão	São José dos Campos	5.56	4.60	-0.41	0.04	4.65	4.36
A744	Bragança Paulista	Campinas	5.39	1.79	-0.15	0.87	-4.88	-1.08
A718	Rancharia	Presidente Prudente	3.91	3.31	0.67	0.76	2.18	1.63
A767	Sao Sebastião	São José dos Campos	3.87	3.42	-3.70	-2.68	-3.38	-3.16
A765	Bertioga	São Paulo	3.80	3.58	0.03	0.14	-2.91	-2.69
A707	Presidente Prudente	Presidente Prudente	3.73	1.88	0.46	0.86	-1.90	-0.83
A728	Taubaté	São José dos Campos	3.69	2.80	0.50	0.71	-2.82	-2.40
A746	Barra do Turvo	Sorocaba	3.66	2.53	0.50	0.76	3.08	1.99
A769	Cachoeira Paulista	São José dos Campos	3.22	2.20	0.61	0.82	-2.41	-1.60
A753	Ituverava	Ribeirão Preto	2.93	1.90	0.77	0.90	-0.31	-0.18
		. . . intermediate stations omitted for brevity . . .						
A770	Sao Simão	Ribeirão Preto	1.74	1.84	0.90	0.88	-0.45	-1.29
A747	Pradópolis	Ribeirão Preto	1.74	1.38	0.91	0.95	0.43	-0.16
A735	Jose Bonifácio	São José dos Campos	1.66	1.31	0.91	0.95	0.18	-0.22
A764	Bebedouro	Ribeirão Preto	1.59	1.66	0.93	0.93	-0.03	-0.11
A766	Registro	Sorocaba	1.56	1.77	0.90	0.88	-0.33	-1.24
A736	Ariranha	São José dos Campos	1.56	1.37	0.93	0.95	-0.06	-0.12
A705	Bauru	Bauru	1.52	1.16	0.92	0.95	0.34	0.18
A741	Barra Bonita	Bauru	1.46	1.42	0.93	0.93	-0.35	-0.63
A701	São Paulo - Mirante	São Paulo	1.42	1.32	0.91	0.92	-0.64	-0.74
A755	Barueri	São Paulo	1.42	1.09	0.92	0.95	0.62	0.19

Table 03: Station-level interpolation accuracy metrics sorted by RMSE. The table shows the ten stations with the largest errors and the ten with the smallest errors. Results compare the nearest-neighbor (NN) method with the IDW configuration (R, α) = (250 km, 2). Regions correspond to IBGE Intermediate Geographic Regions.

Overall, these results indicate that the IDW configuration (R, α) = (250 km, 2) provides a robust interpolation approach across the diverse geographic regions of São Paulo state. Although a small number of stations show similar or slightly higher RMSE under IDW, the overall pattern demonstrates consistent improvements in RMSE, R^2, and Bias relative to the nearest-neighbor baseline. Taken together, the results demonstrate that IDW provides accurate spatial temperature interpolation for the study region, with the combination of a broad search radius and moderate distance-decay exponent producing the most robust estimates. The comparative analysis also highlights the limitations of nearest-neighbor interpolation, reinforcing the importance of spatial weighting and neighborhood design in environmental monitoring applications.

Municipality-Level Analysis

Figure 03 presents the spatial distribution of the minimum and maximum differences between the NN and IDW interpolations for daily mean and daily maximum temperatures at the municipality level during the period 2021–2025.

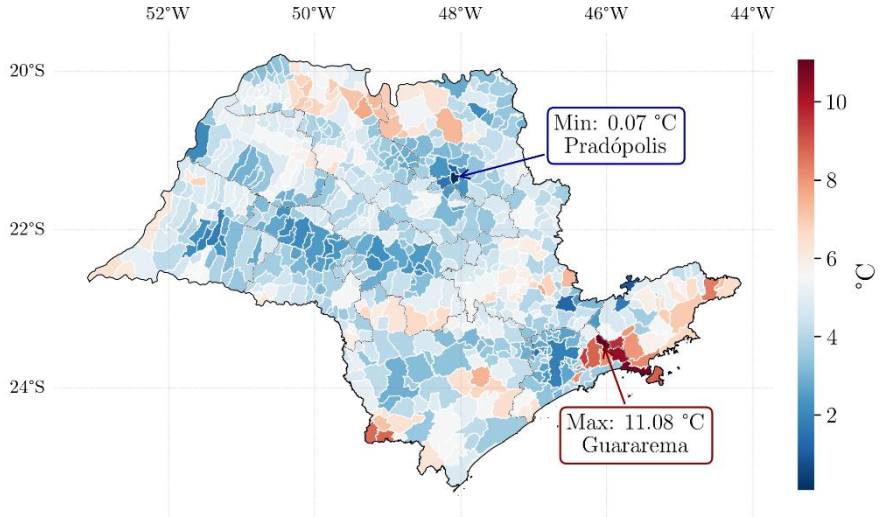


Figure 03: Spatial distribution of differences between the NN and IDW (R, α) = (250 km, 2) interpolations for municipalities in São Paulo state during 2021–2025 of daily maximum temperature.

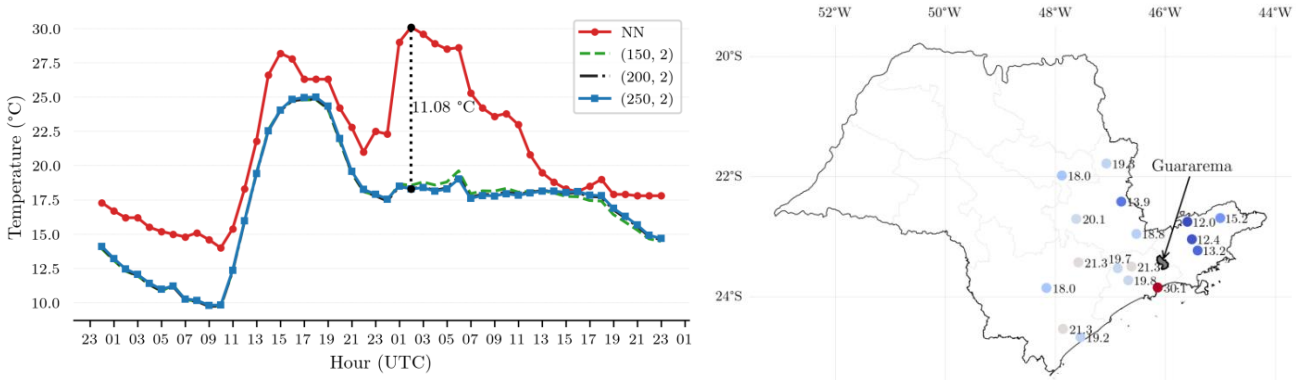


Figure 04: Analysis of the largest discrepancy between NN and IDW interpolation. Left: instantaneous temperature fields for 2022-06-17–18 using NN and IDW (R = 150–250 km, α = 2). Right: observed station temperatures at 02:00 UTC on 2022-06-18, illustrating strong spatial contrasts (e.g., A765: 30.1 °C; A706: 12.0 °C) that lead to the maximum difference of 11.08 °C.

For daily maximum temperature, the difference exceeded 11 °C in Guararema, while the smallest difference was 0.07 °C in Pradópolis (Figure 03). Such discrepancies reflect the challenges of reconstructing localized temperature extremes using spatial interpolation methods. In regions characterized by strong geographic gradients—such as transitions between coastal areas, mountainous terrain, and inland plateaus—nearby stations may record markedly different temperatures, which can lead to large differences between interpolation approaches.

To better understand the origin of the largest discrepancies between interpolation methods, we analyzed the hourly data over the full study period and identified the moment when the difference in maximum temperature between NN and IDW reached its highest value.

Figure 04 (left) shows the instantaneous temperature for 2022-06-17 and 2022-06-18 the nearest-neighbor station and three IDW configurations with search radii of 150, 200, and 250 km (all with α = 2). The largest difference between interpolation methods occurred on 2022-06-18 at 02:00 UTC, when the estimated temperature differed by 11.08 °C between NN and the IDW (250, 2) configuration.

The right panel of Figure 04 shows the observed temperatures at meteorological stations at exactly 02:00 UTC on 2022-06-18. The closest station to the municipality centroid (A765) recorded a temperature of 30.1 °C, whereas another station within the 250 km search radius (A530) measured only 9.1 °C. This strong spatial contrast contributes to the large differences between interpolation methods.

Table 04 lists the surrounding stations, their distances to the municipality centroid, and the corresponding instantaneous temperatures at that time.

Station	Dist. (km)	Temp. (°C)	Station	Dist. (km)	Temp. (°C)	Station	Dist. (km)	Temp. (°C)	Station	Dist. (km)	Temp. (°C)
A765	46.9	30.1	A755	83.2	19.7	A529	160.9	11.8	A738	211.0	19.3
A701	57.6	21.3	A706	88.8	12.0	A530	171.4	9.1	A515	217.9	15.2
A509	63.2	9.8	A769	135.8	15.2	A726	179.2	20.1	A715	219.5	18.0
A740	69.4	13.2	A739	136.2	13.9	A628	186.5	16.5	A766	220.5	21.3
A728	70.0	12.4	A619	138.0	15.3	A567	194.9	18.4	A626	223.9	13.5
A771	70.9	19.8	A531	142.6	7.7	A609	198.0	14.0	A711	246.9	18.0
A744	71.7	18.8	A713	155.6	21.3	A712	204.5	19.2			

Table 04: Meteorological stations located within approximately 250 km of the analyzed municipality centroid at 02:00 UTC on 2022-06-18. Distances refer to the centroid–station separation, and temperatures correspond to instantaneous observations. The large temperature contrasts among nearby stations help explain the divergence between NN and IDW interpolation estimates.

Discussion and Conclusions

The evaluation of spatial interpolation methods shows that inverse distance weighting (IDW) improves temperature estimation compared to the nearest-neighbor (NN) baseline. Across most stations, the configuration with search radius R = 250 km and distance-decay exponent α = 2 produced lower RMSE, higher R^2, and reduced bias. These results indicate that incorporating information from multiple surrounding stations provides a more accurate representation of spatial temperature variability than relying solely on the closest observation.

Interpolation performance, however, varies across regions. Stations located in coastal areas and regions with complex topography, such as São Sebastião, Bertioga, and Campos do Jordão, exhibit higher interpolation errors and lower R^2 values. These areas are influenced by strong environmental gradients associated with the Serra do Mar mountain range and maritime effects, which generate localized temperature patterns that are not easily captured by purely distance-based interpolation methods. Because IDW does not explicitly account for factors such as elevation, land–sea interactions, or terrain-induced microclimates, its performance may be reduced in these environments.

In contrast, stations located in the interior plateau of São Paulo state tend to show lower RMSE and higher R^2 values, indicating that temperature fields in these regions are spatially smoother and more predictable using distance-based interpolation. The relatively homogeneous topography and broader spatial correlation of temperature likely contribute to this improved performance.

Data availability across the meteorological network is heterogeneous, with several stations exhibiting substantial gaps during the study period. The largest deficiencies occur in coastal stations, such as São Sebastião, Bertioga, and Registro, as well as in parts of the southern interior, including the Sorocaba region. In some cases, missing data exceed 30–50% in individual years, reducing the effective density of the observation network and increasing uncertainty in interpolated temperature fields, particularly in areas with strong geographic gradients.

Using the selected IDW configuration, temperature series were generated for the centroids of the 645 municipalities of São Paulo, providing a spatially consistent dataset for municipal-scale climate analyses. While these data support assessments of climate variability and its impacts on sectors such as public health, agriculture, and environmental management, limitations persist in representing extreme values. Interpolation tends to smooth temperature fields, with minor effects on daily means but a potential reduction in extreme magnitudes, especially in regions such as the Vale do Paraíba, where altitude and coastal influences interact over short distances.

This challenge is not limited to temperature. Variables such as precipitation exhibit even greater spatial variability and are directly associated with recent disasters, such as the event that occurred in São Sebastião, highlighting the importance of datasets capable of adequately representing intense events. In this sense, the integrated analysis of different climate variables is essential to understand the dynamics of extremes and their impacts. From an applied perspective, the production of climate data at the municipal scale represents an important step forward in supporting public policies aimed at climate change adaptation and mitigation. Spatially consistent information on temperature and precipitation can support actions in areas such as urban planning, risk management, and public health, especially in a context of intensifying extreme events.

Overall, these findings highlight both the potential and the limitations of interpolation-based climate datasets for municipal-scale applications. While they provide useful approximations for regional climatology and enable territorially consistent climate indicators, caution is required when analyzing extreme events such as heat waves, as peak temperatures may be underestimated and uncertainties may increase in regions with sparse or incomplete observational coverage.

Future work may improve interpolation performance by incorporating additional geographic predictors, such as elevation and land-surface characteristics; exploring alternative interpolation techniques; and integrating complementary data sources. In particular, geostatistical approaches that allow the incorporation of auxiliary variables, such as geostatistical coestimation methods, may provide improved spatial estimates in regions with strong environmental gradients (Yamamoto & Landim, 2013). Expanding and maintaining the monitoring network and improving data completeness would also enhance the reliability of spatial climate estimates at the municipal scale.

References

AB'SÁBER, A. N. Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o quaternário. Geomorfologia, São Paulo, Igeog-USP (18), 1969.

AB'SÁBER, A. N. Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. In: Recursos Naturais, Meio Ambiente e Poluição. Rio de Janeiro: IBGE, 1977.

HOFSTRA, N.; NEW, M.; MCSWEENEY, C. The influence of interpolation and station network density on the distribution and extremes of daily climate variables in gridded climate datasets. Climate Dynamics, v. 35, n. 5, p. 841–858, 2012. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-009-0698-1

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa – BDMEP. Brasília: INMET, 2023. Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/. Acesso em: 17 mar. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009157896.

LI, J; HEAP, A.D., 2008. A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists. Geoscience Australia, Record 2008/23, 137 pp.

NEW, M.; LISTER, D.; HULME, M.; MAKIN, I. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. Climate Research, v. 21, n. 1, p. 1–25, 2002. DOI: https://doi.org/10.3354/cr021001

ROSS, J. L. Geomorfologia: ambiente e planejamento. São Paulo: Contexto, 1996.

SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data. In: ACM NATIONAL CONFERENCE, 23., 1968, Princeton. Proceedings […]. New York: Association for Computing Machinery, 1968. p. 517–524. DOI: https://doi.org/10.1145/800186.810616

YAMAMOTO, J.K., LANDIM, P.M.B.: Geoestatística: Conceitos e Aplicações, 1st edn., p. 215. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil, 2013.

IMPACTO DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA ÁFRICA OCIDENTAL: UM DEBATE SOBRE O ESTADO DA DEGRADAÇÃO AMBIENTAL NA GUINÉ-BISSAU DURANTE AS PRIMEIRAS DÉCADAS DO SÉCULO XXI.

Sissé Seidi
Universidade de São Paulo, e-mail: sissesedi@usp.br

Palavras-chave: Guiné-Bissau; Mudança Climática; Degradação Ambiental.

Resumo

Este breve ensaio que apresentamos é fruto de um estudo preliminar a respeito da sustentabilidade ambiental e os seus impactos na sociedade africana, especialmente guineense (na Guiné-Bissau). O estudo buscou, por meio de dados científicos, estudar a crise climática e promovendo um debate sobre o estado da degradação ambiental e ecossistemas nesta nação da África Ocidental. Nessa perspectiva, partiu da uma compreensão das profundas causas que geram os impactos sociais. O trabalho foi elaborado com base na metodologia de pesquisa qualitativa. Dessa forma, utilizam-se duas modalidades de pesquisa acadêmica no mesmo estudo: bibliográfica e documental. Em termos de resultados, observou-se que o impacto climático na África Ocidental e na Guiné-Bissau causam muitos prejuízos socioambientais, decorrentes das mudanças climáticas que promovem chuvas intensas.

Introdução

A região da África Ocidental, nos últimos tempos, vem sendo associada a um alto índice de instabilidade político-militar que afeta todo o desenvolvimento das atividades econômicas. Mas além disso, de acordo com Wright et al. (2023), a África é particularmente vulnerável aos impactos das mudanças climáticas que impactam as suas economias agropecuárias, marcada pela infraestrutura precária e baixos níveis de tecnologias aplicadas a agricultura e a indústria local. Outros fatores também devem ser considerados como a sua geografia e a instabilidade política, que ajudam a criar entraves ao desenvolvimento, promovendo atrasos na compreensão dos fenômeno pela dificuldade de promoção de estudos ambientais. Ademais, não há o comprimento das metas traçadas nos congressos (conferências internacionais sobre clima e meio ambiente) e convênios assinados pelos sucessivos governos. Esse contexto torna um desafio entender melhor as questões ambientais para promover ações sustentáveis mais robustas para minimizar os efeitos das mudanças climáticas (Moraes, 2022).

Há um elevado risco de intensificação dos efeitos da crise climática devido a escassez de políticas públicas, associado a crônica instabilidade governamental que compromete os aparelhos estatais. Neste contexto, por exemplo, a Guiné-Bissau é uma dessas nações. Além de ser um país altamente vulnerável, com profunda instabilidade governamental, com a escassez de recursos financeiros, apresenta um quadro sintomático marcadamente desfavorável ao desenvolvimento ambiental e sustentável, como debatido nas conferências mundiais. Essa nação africana, no entanto, possui uma localização geográfica, que lhe permite dividir as fronteiras terrestres com as duas antigas colônias francesa na África Ocidental: república senegalesa e Guiné-Conakry (R.G.B, 2019), (SANTY, 2016).

A África Ocidental, além de ser altamente vulnerável em termos sociais, políticos e econômicos, enfrenta desafios estruturais. Torna difícil cumprir rigorosamente com as metas e os objetivos de milênio. Segundo a ORANIZAÇÃO METEOROLOGICA MUNDIAL (2024), o continente enfrenta um fardo desproporcional devido as mudanças climáticas e os custos adicionais de adaptação. Nos últimos tempos, as catástrofes climáticas vem aumentando as temperaturas na África de forma ligeiramente acima de média global. Por isso, as secas pluviais continuam a serem verificadas nas regiões mais densas do continente africano. O mesmo estudo aponta que as inundações e secas prolongadas causadas pelas mudanças ambientais, também causaram extrema perda de recursos e danos aos agricultores, sobretudo nas comunidades rurais.

Portanto, as nações africanas, sobretudo as da África Ocidental, por serem mais vulneráveis, por não conseguirem recursos estatais, continuam a enfrentar crescentes ondas de temperaturas, provocadas pelas mudanças climáticas na região. Torna-se, entretanto, necessário prestar maior atenção aos fenômenos sociais e ambientais que, nas últimas décadas, tem afetado crescimento do desenvolvimento local e o bem-estar das comunidades. Outrossim, este estudo busca, por meio da análise estruturada, compreender os fenômenos climáticos através de uma investigação pormenorizada. O presente artigo analisa o impacto da mudança climática na África Ocidental, especialmente na Guiné-Bissau, buscando construir um debate sólido em torno da questão ambiental e das transformações climáticas na região. Toma-se como ponto de referência a República da Guiné-Bissau, com o objetivo de compreender as causas profundas e as implicações que esse fenômeno tem produzido, no passado recente, sobre a sociedade atual.

Na sua elaboração corporal, este artigo está dividido em duas partes. Na parte inicial, concentramos nossa atenção sobre a devastação climática na África Ocidental, como a região delimitada no esboço da pesquisa. Desse modo, no segundo bloco argumentativo, o esboço será voltado à sociedade guineense (Guiné-Bissau) em geral, tomando a vulnerabilidade no âmbito ambiental desta nação africana como modelo. Como pode ser verificado ao longo do texto, os pontos a serem abordados serão: temperaturas extremas, inundações, erosão costeira, impacto na agricultura e deslocamento humana, ou seja — os fluxos rurais-urbano ou internacionais. No fundo, concentra-se nesses elementos. Este artigo, no entanto, poderá contar com contribuições para a ciência. No âmbito empírico, que a região pesquisada neste estudo apresenta uma escassez de informações e de estudos

acadêmicos recentes sobre a questão climática e ambiental. Além disso, Fonjong, et. al (2024), consideraram que as mudanças climáticas e seus impactos não são menos urgentes, mas receberam relativamente menos atenção e apoio no contexto socioeconômico e político singular da África. Esse elemento, deve estar alinhado com a insuficiência do conhecimento sobre fatores ambientais.

O que Komutai (2025) denomina de *assassinas silenciosas*, — as pessoas com desconhecimento do perigos ambientais, principalmente por não terem familiaridade com os riscos que as ondas de calor são capazes de causar. As ondas de calor podem levar à desidratação, insolação e até à morte. Em especial, na Guiné-Bissau, tanto as autoridades locais e como a população em geral carecem das informações básicas a respeito da crise climática. Segundo estudo de BIAI; SOUZA (2019), a insuficiência do conhecimento a respeito da questão ambiental e climática tem estreita ligação com a escassez da política educativa existente no país, principalmente referente a educação Ambiental (AE). No segundo bloco, o estudo poderá auxiliar, no futuro próximo, na análise para colmatar as possíveis causas do agravamento da crise ambiental, face às profundas degradações que vem sendo verificadas nos últimos anos, sobretudo na região do Sahel. De acordo com estudo de Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2024), a possibilidade para erradicação deve exigir investimento em infraestrutura hidrometeorológica e sistema de ponta, servindo de meio de alerta para eventos climáticos extremos de alto impacto. A OMM (2024) aponta que são necessários investimento nos serviços Meteorológicos e Hidrológicos nacionais (SMHN), isto, com vista aprimorar a coleta de dados e permitir a melhoria na capacidade e previsão. No fundo, consideramos que há uma necessidade de urgência de investir seriamente em tecnológica e sistema de ponta, como apontado pelo estudo, para aumentar a precisão e antecedência na previsão climática.

Métodos

Esse estudo, por ser um conhecimento recente no contexto nacional na Guiné-Bissau, cabe percorrer diversas modalidades da pesquisa, com vista a coleta satisfatória dos dados científicos, levando em conta que nesta nação africana tem limitações em termos da produtividade acadêmica. Os dados acabam por serem escassos em termos da sua obtenção e fidelidade científica. Assim, traçamos o nosso olhar à modalidade da pesquisa exploratória, — através da pesquisa qualitativa. Além da pesquisa qualitativa como meio da coleta sistemática dos dados, o estudo assume o caráter metodológico de pesquisa exploratória com fundamentos de fontes bibliográfica. Além disso, pautamos na coleta de dados com base no afunilamento da pesquisa qualitativa, tendo em vista que a pesquisa assumiu um caráter cientificista e teórico, Gil (2002). Inicialmente, recorremos a pesquisa bibliográfica para colmatar as lacunas existentes no processo da escrita deste manuscrito. As fontes bibliográficas são escassas. Por isso, recorremos também aos *sites* de notícias internacionais e periódicos científicos internacionais, com vista a dar complementaridade nas informações.

Problemática e discussão

O continente africano, nos últimos anos da colonização e no início da abertura democrática, enfrentou vários tipos de problemas que não têm apenas origem interna. Sobretudo, algumas dessas tribulações estavam ligadas à questão ambiental e às mudanças climáticas. Segundo Wright et al. (2024); (ROCHA, 2022), a África é considerada o continente mais afetado pela mudança climática. Embora tenha contribuído pouco para causar crise climática. Kamutai (2025) aponta que temperatura aumenta aproximadamente 0, 3°C por décadas entre 1991 e 2021, tornando a elevação do nível médio de mar ao longo do litoral africano maior do que a taxa média global. A evidência observou-se que esse fenômeno se intensificar no futuro provavelmente é maior. De acordo com Fonjong, et. al (2024), o continente africano está entre os que, historicamente, pela narrativa cronológica, menos faz emissão de carbono em escala global. Por outro lado, não deixa de estar entre os mais vulneráveis em termos de mudanças climáticas. O estudo aponta que as mudanças climáticas afetam drasticamente os países africanos de diversas maneiras. Entre elas destacam: o agravamento de estresse hídrico, a deterioração de colheitas agrícolas, e o impacto no estilo de vida e ampliação na possibilidade de desigualdade de gênero.

Além dessas situações, o continente se depara com as chuvas torrenciais originadas pela subidas de água de mar. Em resumo, podemos afirmar que a temperatura, as precipitações e a ocorrência de eventos climáticos e meteorológicos extremos estão mudando muito algumas partes da África (Wright et al, 2023). De acordo com a reportagem das Nações Unidas (2024), a África Ocidental é muito afetada por danos causados pelas inundações. Por exemplo: a Nigéria, uma das nações mais populosas da África Ocidental, concentra-se 20 % dos mais de 5 milhões das pessoas afetadas. Por um lado, agência da ONU para os Refugiados (ACNUR, 2024), implora por proteção e ajuda das minorias afetadas, lamentando as dificuldades em que as pessoas vítimas das enchentes enfrentavam na África Ocidental. A ONU afirma que no Chade, país da África Central, por exemplo, cerca de 1, 9 milhões de pessoas foram afetadas. Assim como em Niger 1, 4 milhões e na Nigéria, novamente, também foi severamente impactada, como os Camarões com 365 mil e Mali, com aproximadamente 260 mil.

Outrossim, acrescentou que os danos ambientais nesta região da África são causados pelo aquecimento global que tem promovido e um elevado nível de subida da água de mar, além de provocar uma erosão costeira. O estudo averigua que a elevação do nível da água do mar representa uma ameaça para África Ocidental. As ondas das águas costeiras tornam-se cada vez mais fortes, as mares avançam sobre as comunidades, devastando as moradias precárias e agriculturas (AHEDOR, 2019). Além desses casos apontados, podemos verificar, por meio de sexto relatório de avaliação do impacto climático e ambiental, de painel intergovernamental sobre mudanças climáticas, — na sigla em inglês (IPCC), prevê que várias partes da África Ocidental sofrerão aumento na frequência e duração das secas em cenários climáticos futuros. As previsões demonstram que as secas podem causar perturbações significativas nas produções agrícolas, incluindo, supostamente, a diminuição da produtividade das colheitas e a redução das taxas de crescimento dos animais (Wright et al, 2024).

Os estudos demonstram que algumas nações da África Ocidental apresentam mais riscos em relação a outros países. Caso exemplar, é a Gana, que figura entre as nações mais afetadas pela subida da água do mar. Além disso, o aumento de temperatura afetou a produtividade dos habitantes da região. As (NAÇÕES UNIDAS, 2024) apontou que o aumento da temperatura causou a imigração, enquanto o processo de salinização contaminou a produção dos camponeses. Por outro lado, no estado de Borno, na Nigéria, as inundações causaram doenças contagiosas e obstruíram o acesso aos serviços essenciais, provocando atraso no acesso aos serviços básicos de saúde na população, segundo as (NAÇÕES UNIDAS, 2024). Wright et al. (2024), afirmaram que as tempestades, os incêndios florestais, e as ondas de calor, associados aos ciclones, inundações, tempestades de poeiras são exemplos que podem ser tomados para compreender os eventos extremos associados aos ferimentos, mortalidade, efeitos na saúde mental e perda ou danos nas infraestruturas, incluindo o sistema de saúde. Similarmente, a África Ocidental carência das políticas públicas sanitárias. Qualquer eventos fortes ligados a questão climática têm efeitos negativos nas pessoas. Os fatores da alteração na concentração de poluição atmosférica, também poderão afetar a saúde infantil. O que pode resultar no futuro próximo, num agravamento da saúde respiratória de crianças que sofrem de asmas, alergias e outras doenças respiratórias (Wright et al, 2024). Além disso, os autores ressaltaram que, numa sociedade com essa onde há com frequência queimada de lixos Orgânicos e Inorgânicos tóxicos e resíduos de forma descontrolada, há grande possibilidade de maiores problemas respiratórios para a população no geral.

Os problemas não pararam por aqui. Podemos colocar em destaque Benin, Costa de Marfim e o Togo. Segundo AHEDOR (2019), estes países enfrentaram uma alta taxa de erosão costeira ou elevação do nível do mar. Os danos levaram os governos a gastarem muitos recursos do tesouro público. Segundo AHEDOR (2029), estes foram usados para redução dos danos nas comunidades mais desfavorecidas. O estudo aponta ainda que os gastos rondaram aproximadamente US$ 2 bilhões ao tesouro público marfinense. Na sua totalidade, a África apresenta problemas graves quando falamos de mudanças climáticas, (Wright et al, 2024); Kamutai (2025). Segundo GAMBA (2023) as colheitas estão diminuindo e as perdas de gados estão avançando em decorrência do aumento das ondas de calor, nos períodos de seca. Do mesmo modo, Kamutai (2025), reforça essa situação, argumentando que as mudanças climáticas aumentaram a intensidade da mortalidade por meio das ondas de calor e outros eventos climáticos extremos. Os prejuízos apontados, segundo a pesquisa, é além de levar as pessoas à morte, causam grande danos as pessoas e as propriedades, como a destruição de colheitas e/ou o rompimento de estrutura em edifícios e fechamento dos prédios escolares devido ao nível de insolação que as crianças enfrentavam.

Na Guiné-Bissau, o impacto ambiental pode ser vista de várias maneiras. Compensemo-nos nos começar pela questão agrícola, dada a sua magnitude territorial e uso de terra pelos populares. As narrativas demográficas e etnográficas vem demonstrando que a terra e florestas sofreram densamente estragos devido a corte de madeira e extração de carvão. Segundo Temudo (2009 apud Ickowiz, 2006); (IBAP; IRCHB 2017); (GUINÉ-BISSAU, 2011), as florestas foram destruídas devido ao abate de árvores para fins agrícolas, e energéticos, sobretudo — a produção de carvão para uso domésticos, ou seja, o corte de recursos lenhosos para queima de carvão. Vale salientar que carvão é dos produtos mais consumido na sociedade guineense para afazeres domésticos, devido a não utilização de gás natural nas atividades cotidiana. Isso contribui, de maneira não exemplar, para degradação e danos nas florestas reservadas pelas vias tradicionais. Por outro lado, depois da luta de libertação violenta e armada, travada pela milícia do PAICG (Partido Africano Para Independência da Guiné e Cabo Verde) na então Guiné-Bissau, os sucessivos governos passaram a explorar, de forma mais rápida, as madeiras, com vistas a alavancar o crescimento da economia nacional e do Estado Novo (partido único na época). Esse processo levou a uma devastação das florestas sem controle algum. Não que não houvesse, na época medidas protetivas com os métodos e técnicas de conservação. Havia um número de quadros restritos de ambientalistas, que consideravam que a exploração de madeira foi uma das causas da desflorestação, já que essa atividade estava estreitamente ligada ao rendimento econômico (TEMUDO, 2009).

Numa outra perspectiva, já de caráter humanitária, UNICEF (2024) alega que o impacto das mudanças climáticas e fatores ambientais não apenas incidem nas plantas e florestas, mas os danos refletem na vida das pessoas, sobretudo das crianças. As crianças são consideradas mais vulneráveis as catástrofes naturais e sociais. De acordo com UNICEF (2024), as alterações climáticas afetam o direito das crianças na Guiné-Bissau. Considera que todos os anos os fenômenos meteorológicos extremos colocam em risco a vida de mais crianças. Os fatos foram mais evidenciados quando cheias acontecem, já que escolas, casas e hospitais são destruídas. Nos períodos das secas, as familiares perdem os seus meios de subsistência. As alterações climáticas são uma ameaça para a sociedade africana, especialmente guineense. Podemos verificar no cotidiano das pessoas. Quando é calor extremo, há aumento de caso de insolação e desidratação, aumento de risco de vida, perda de peso nas crianças, crescente risco de doenças transmitidas por alimentos e águas. Por outro lado, há aumento de risco de doenças transmitidas por vetores, incluindo malária e dengue (UNICEF, 2024). O mesmo estudo da UNICEF (2024) considera que a seca tem aumentado o risco da deslocação, obrigando as pessoas a migrar das suas casas para zonas mais distantes, impactando principalmente as mulheres e crianças, que são obrigadas a percorrer mais distâncias para coletar a água, o que coloca em risco maior de violência e abuso (UNICEF, 2024). Este estudo também salienta de forma resumida que os efeitos das mudanças climáticas na África Ocidental e em especial na Guiné-Bissau, pode estar acirrando fenômenos como inundações, tempestades e aumento do nível da água do mar. A salinização das fontes e águas passam a serem vistas como outro problema, levando a escassez da água potável para ao consumo e agricultura, agravando os problemas de saúde.

Potencial para Erradicação e Mitigação

Para que haja erradicação e mitigação, deve existir um Plano Nacional de Gestão Ambiental (PNGA) nos países africanos, tal como ocorre na Guiné-Bissau. Esse órgão estatal tem como finalidade estudar previamente os impactos ambientais,

buscando fornecer informações de forma antecipada. Ademais, propõe-se a criação de centros de estudo responsáveis pelo monitoramento dos impactos ambientais. Trata-se, em última instância, de tornar a avaliação e a gestão dos impactos ambientais uma prioridade para os governos. Por outro lado, é igualmente necessário fomentar a criação de leis que visem à redução dos impactos ambientais. Como no caso da Guiné-Bissau, observa-se a existência de legislação nacional voltada ao combate à degradação ambiental. Trata-se da Lei de Base do Ambiente, que se configura como um mecanismo jurídico cuja prioridade reside na manutenção e no controle dos recursos naturais. Essa legislação busca assegurar o uso racional dos recursos naturais e da biodiversidade por meio da intervenção da administração estatal (GUINÉ-BISSAU, 2011). Nessa perspectiva, cabe esclarecer que esse instrumento normativo é composto por diversos artigos que lhe conferem sustentação jurídica, estruturados com base em um arcabouço legal específico. Como exemplo, destaca-se o artigo 2º da Lei n.º 1/2010, cujo objetivo é estabelecer diretrizes estratégicas para a implementação de políticas ambientais, bem como para a manutenção de reservas ambientais (GUINÉ-BISSAU, 2011).

Algumas nações da África Ocidental possuem, de fato, legislações destinadas à proteção da fauna e da flora. No entanto, as medidas adotadas mostram-se insuficientes em razão da escassez de recursos financeiros e orçamentários necessários para a implementação e o desenvolvimento de estudos ambientais. Pesquisas têm apontado que, diante das recorrentes crises de instabilidade política e financeira enfrentadas pelo continente, torna-se necessária a intensificação do apoio dos países mais ricos à África, com vistas à busca de soluções capazes de contribuir para a mitigação dos impactos ambientais (ROCHA, 2022). Outros mecanismos também podem ser utilizados para combater esse fenômeno, desde que sejam devidamente implementados e recebam o devido reconhecimento no âmbito acadêmico. Nesse sentido, as instituições africanas, especialmente universidades e centros de pesquisa, podem constituir uma importante ligação com o exterior no desenvolvimento de estudos sobre os danos ambientais. Tais instituições podem atuar como pilares na investigação das origens desses eventos. De acordo com Ribeiro (2024), também podem ser fomentados projetos de cooperação técnica voltados à ampliação do conhecimento meteorológico. Nesse sentido, os efeitos desses fenômenos poderiam ser significativamente reduzidos caso houvesse maior cooperação.

Considerações Finais

A questão das mudanças climáticas não deve ser considerada um entrave ao desenvolvimento das nações africanas. Embora as leituras de fontes documentais e das bibliografias utilizadas neste artigo evidenciem a existência desses problemas, é importante salientar que a África também deve assumir sua responsabilidade no enfrentamento das dificuldades financeiras e dos obstáculos existentes, com vistas a contribuir para a erradicação dos impactos climáticos. Nesse sentido, torna-se fundamental o aprimoramento das políticas públicas ambientais. As normas ambientais internacionais, bem como as legislações nacionais vigentes, devem ser consideradas e priorizadas. Ademais, algumas análises indicam que, em determinadas nações africanas, há fragilidades no poder legislativo, o que torna menos rigorosas as tomadas de decisão voltadas ao enfrentamento dos prejuízos ambientais.

Em seguida, conclui-se que, quanto mais existirem mecanismos de sensibilização e de educação cívica no domínio ambiental, maior será a tendência de erradicação e mitigação dos impactos ambientais num futuro próximo. Entretanto, os estudos que compõem a base argumentativa deste artigo indicam que algumas sociedades ainda desconhecem, em grande medida, os perigos associados às questões ambientais. Situações dessa natureza são recorrentes em determinadas sociedades africanas, especialmente na Guiné-Bissau. De forma sintética, alguns estudos apontam que a problemática ambiental ainda não é considerada uma questão urgente pela sociedade civil africana. Contudo, tais análises também ressaltam que as pautas estabelecidas em convenções internacionais tendem a ganhar repercussão no âmbito nacional apenas quando são monitoradas e submetidas a mecanismos de controle mais rigorosos por parte de organizações não governamentais internacionais.

Em síntese, alguns trabalhos acadêmicos apontam, de forma resumida, que determinadas nações africanas, sobretudo da África Ocidental, assinam acordos climáticos e ambientais, muitas vezes, com o objetivo de beneficiar-se dos financiamentos destinados à manutenção das ações de proteção ambiental e à mitigação dos danos ambientais. Contudo, ao se examinar a aplicabilidade dos investimentos realizados para a redução dos impactos climáticos e ambientais na região, observa-se que seus resultados são bastante limitados. Dessa forma, conclui-se, com base na análise acadêmica realizada, que este capítulo oferece elementos que podem servir como subsídios para a compreensão e a identificação dos impactos climáticos e ambientais na África Ocidental, em especial na Guiné-Bissau.

Agradecimento

O nosso total agradecimento ao CAPES pelo recurso financeiro. Em especial, ao programa de pós-graduação em Sustentabilidade da Universidade de São Paulo (USP). Sem esquecer os colegas que nas horas vagas discutíamos as metodologias e técnicas de pesquisa acadêmico. Colegas, agradecemos a leitura e sugestão sobre o melhoramento da grafia e norma culta da língua portuguesa

.

Referência Bibliográfica

ACNUR – Alto Comissariado das Nações Unidas para Refugiados. **ACNUR pede ajuda urgente para 228 mil pessoas afetadas por inundações na África Ocidental**. *ACNUR Brasil*, 1 nov. 2024. Disponível em: https://www.acnur.org/br/noticias/notas-informativas/acnur-pede-ajuda-urgente-para-228-mil-pessoas-afetadas-por-inundacoes. Acesso em: 12 dez. 2025.

AHEDOR, Jessica. **Sea-Level Rise: West Africa Is Sinking**. *Earth.Org*, 24 set. 2019. Disponível em: https://earth.org/sea-level-rise-west-africa-is-sinking/. Acesso em: 10 mar. 2026.

BIAI, Nem; SOUSA, Roberth Fagundes de. **Educação ambiental e percepção dos problemas ambientais da Guiné-Bissau pelos guineenses.** In: Congresso Nacional de Educação (CONEDU), 2019. Anais… Campina Grande: Realize Editora, 2019.
Clima-Info. **Mudanças climáticas geraram superonda de calor na África Ocidental.** 25 de março de 2024. Disponível em: https://climainfo.org.br/2024/03/25/mudancas-climaticas-geraram-superonda-de-calor-na-africa-ocidental/ . Acesso em: 27.01. 2026.

FONJONG, Lotsmart N.; MATOSE, Frank; SONNENFELD, David A. **Climate change in Africa: Impacts, adaptation, and policy responses.** *Global Environmental Change*, v. 89, p. 102912, 2024. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2024.102912. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095937802400116X Acesso em: 05.04.2026.

Gil, Antônio Carlos, 1946- **Como elaborar projetos de pesquisa**/Antônio Carlos Gil. - 4. ed. - São Paulo: Atlas, 2002.
GRUPO BANCO AFRICANO DE DESENOLVIMENTO. **Foco em África.** COP3O BRASIL AMAZONIMA BELÉM 2025. Disponível em: https://www.afdb.org/pt/cop-30-brasil-amazonia/foco-em-africa . Acesso em: 27/01/2026.

GUINÉ-BISSAU. (**Lei-quadro da Áreas Protegidas de Boletim Oficial N º 9 Decreto-Lei Nº 5-A/2011**). Bissau, 2011. Disponível em: https://ligaambientalguineense.com/wp-content/uploads/2025/09/Lei-1_2011Lei-de-base-do-Ambiente-1.pdf . Acesso em: 12. 03. 2026.

IGAMBA, Joan. **Climate change in South Africa: 21 stunning facts about South Africa's climate breakdown**. *Greenpeace Africa*, 30 ago. 2023. Disponível em: https://www.greenpeace.org/africa/en/blog/54171/climate-change-in-south-africa-21-stunning-facts-about-south-africas-climate-breakdown/. Acesso em: 04 mar. 2026.
INSTITUTO REAL DAS CIÊNCIAS NATURAIS DA BÉLGICA; INSTITUTO DA BIODIVERSIDADE E DAS ÁREAS PROTEGIDAS. ***Relatório do Projeto: Sensibilização e Educação Ambiental dos Agentes de Desenvolvimento Local sobre a Gestão Durável da Biodiversidade e dos Recursos Naturais na Guiné-Bissau*. Guiné-Bissau**, 2017. Disponível em: https://www.cbd.int/doc/world/gw/gw-nbsap-oth-p2-pt.pdf. Acesso em: 12 Dez. 2025.
KIMUTAI, Joyce. **Climate change has doubled the world's heatwaves: how Africa is affected**. The Conversation, 2 jul. 2025. Disponível em: https://theconversation.com/climate-change-has-doubled-the-worlds-heatwaves-how-africa-is-affected-258594. Acesso em: 21 jan. 2026.

MORAES, Fernanda de Rangel. **Mudanças climáticas, Conflitualidades e Sistemas de Crises No Sahel (África Ocidental).** Boletim GeoÁfrica, vol. 1, n.1, p. 76-90, jan-mar 2022. Disponível em: https://revistas.ufrj.br/index.php/bg/article/view/51609. Acesso: 31. 01. 2026.

Nações Unidas. Clima extremo causa impacto crescente em países africanos. *UN News*, 2024. Disponível em: https://news.un.org/pt/story/2024/10/1839501. Acesso em: 13 mar. 2026.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM). ***A África enfrenta um fardo desproporcional devido às mudanças climáticas e aos custos de adaptação*.** Abidjan, Costa do Marfim, 2 set. 2024. Comunicado de imprensa. Disponível em: https://wmo.int/news/media-centre/africa-faces-disproportionate-burden-from-climate-change-and-adaptation-costs . Acesso em: 5 mar. 2026.

REPÚBLICA DA GUINÉ-BISSAU. Secretaria De Estado Do Ambiente. **sexto relatório nacional sobre a diversidade biológica da república da Guiné-Bissau. Bissau, 2019.**
Disponível:https://drive.google.com/drive/u/0/folders/11jidP3kpvgMXiWraOh_xqcec1QG5Xbag Acesso: 24. 01. 2026.
RIBEIRO, Renata Albuquerque. ***Cooperação em clima pode ser a nova ponte sobre o Atlântico***. Plataforma CIPÓ, 24 maio 2024. Disponível em: https://plataformacipo.org/cooperação-em-clima-pode-ser-a-nova-ponte-sobre-o-atlântico . Acesso em: 12 mar. 2026.
ROCHA, Lucas. ***Em mais de 250 periódicos, cientistas cobram líderes por justiça climática para África***. CNN Brasil, São Paulo, 18 out. 2022. Disponível em: Acessar a notícia. Acesso em: 12 mar. 2026.

SANTY, Boaventura Rodrigues Vaz Horta. **Dimensões sociopolíticas de adaptação as mudanças climática na Guine Bissau** / Boaventura Rodrigues Vaz Horta SANTY; São Carlos, 2026.

TEMUDO, Marina Padrão. **A narrativa da degradação ambiental no Sul da Guiné-Bissau: uma desconstrução etnográfica.** *Etnográfica*, Lisboa, v. 13, n. 2, p. 237-264, 2009. Disponível em: https://journals.openedition.org/etnografica/1346 . Acesso em: 26 nov. 2026.

THE ClIMATE REALITY PROJET. **How the Climate Crisis is Impacting Ghana?** 28 de junho de 2023. Disponível em: https://www.climaterealityproject.org/blog/how-climate-crisis-impacting-ghana. Acesso em: 09. 01. 2026.

UNICEF. **Análise da Paisagem Climática para as Crianças (CLAC): Guiné-Bissau**. [Bissau]: UNICEF Guiné-Bissau, 2024. Disponível em: https://www.unicef.org/guineabissau/pt/media/3676/file/Resumo%20do%20CLAC%202024.pdf.pdf .Acesso em: 23 jan. 2026.

WRIGHT, Caradee Y.; KAPWATA, Thandi; NAIDOO, Natasha; et al. **Climate Change and Human Health in Africa in Relation to Opportunities to Strengthen Mitigating Potential and Adaptive Capacity: Strategies to Inform an African "Brains Trust"**. *Annals of Global Health*, v. 90, n. 1, 2024. Disponível em: https://annalsofglobalhealth.org/articles/10.5334/aogh.4260. Acesso em: 08 mar. 2026.

CONTRIBUIÇÃO ÀS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DECORRENTE DA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE DESASTRE HIDROLÓGICO EM ATERROS SANITÁRIOS: ESTUDO NO SUL DO ESPÍRITO SANTO, BRASIL

1 Ana Clara Frederico Hoffmann, 2 Jacqueline Rogeria Bringhenti, 3 Wanda Maria Risso Günther

1 Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), e-mail: anahoffmann987@gmail.com; 2 Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), e-mail: jacquelineb@ifes.edu.br; 3 Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo (FSP/USP), e-mail: wgunther@usp.br

Palavras-chave: Emissões; aterro; resíduos de desastres.

Resumo

A intensificação de eventos climáticos extremos tem ampliado significativamente a geração de resíduos de desastres (RD), impondo desafios adicionais à gestão pública municipal. Nesse contexto, o presente estudo objetivou avaliar os efeitos da destinação final de RD gerados em episódios de desastre hidrológico com foco nas emissões de GEE associadas. O gerenciamento dos RD de quatro municípios mais impactados pelas chuvas intensas que atingiram o sul do Espírito Santo, Brasil, no verão de 2024, foi escolhido como estudo de caso. Como estratégia metodológica foi adotada a combinação do uso da ferramenta do Programa Brasileiro GHG Protocol para quantificação das emissões no aterro, com a aplicação do modelo First Order Decay (FOD), conforme as diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), para estimativa das emissões de metano provenientes da decomposição dos resíduos dispostos. A massa de resíduos destinadas ao aterro sanitário pelos municípios avaliados no ano de 2024, diferenciadas em resíduos sólidos urbanos (RSU) e RD foram os principais dados de entrada para realização do estudo. Os resultados indicaram que a disposição final dos RD nesse aterro apresenta potencial de emissão de 125.812,53 tCO_2e ao longo de 25 anos posteriores ao depósito, o que seria 34,7% superior às emissões esperadas em condições normais de operação. Os resultados evidenciam que a geração de resíduos de desastres pode provocar impactos significativos no sistema de disposição final, reforçando a necessidade de planejamento prévio e de estratégias específicas para sua gestão com vistas a desviar essa destinação de aterros sanitários para alternativas sustentáveis.

Introdução

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (2023), cerca de 3,6 bilhões de pessoas vivem em regiões em contexto de alta vulnerabilidade a mudanças climáticas. Por outro lado, o aumento de eventos meteorológicos e climáticos extremos tem resultado na exposição de milhões de pessoas à insegurança alimentar aguda e reduzido a segurança hídrica. Nos últimos anos, foram observadas as maiores taxas de crescimento das emissões de dióxido de carbono, como verificado no observatório de Mauna Loa no Havaí, além do aumento na ocorrência mundial de desastres naturais de cinco vezes, nos últimos 50 anos (REIS JUNIOR ET AL., 2023).

Esse cenário aponta a importância de tornar as cidades mais resilientes e alinhadas aos objetivos da Agenda 2030, especialmente com relação ao ODS 11, que busca ampliação da capacidade de adaptação urbana e a redução dos impactos associados a desastres. Em 2020, de acordo com os Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (BRASIL, s.d), 47% dos municípios brasileiros adotavam e implementavam estratégias locais de redução de risco de desastres, consoantes com as estratégias nacionais. No estado do Espírito Santo, a porcentagem de municípios seguindo as diretrizes do ODS 11 é de 93,6% (BRASIL, s.d), ainda assim, segundo a Confederação Nacional de Municípios (2025), o estado registrou, entre 2013 e 2024, 728 decretos de Situação de Emergência (SE) ou Estado de Calamidade Pública (ECP) devido a chuvas intensas e prolongadas.

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) estão diretamente ligadas à intensificação do aquecimento global, pois os GEE absorvem a radiação emitida pela terra resultando no aquecimento da superfície (JAIN, 1993). Esses gases, como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), possuem diferentes potenciais de aquecimento global e calor e distintos tempos de permanência na atmosfera (MYHRE et al., 2013). No setor de resíduos sólidos, a decomposição em aterros sanitários produz quantidades significativas de metano (CH4), sendo responsável por cerca de 90% das emissões do setor, e ainda 18% das emissões antropogênicas globais de metano (Bogner et al., 2008).

O metano apresenta elevado potencial de aquecimento global sendo aproximadamente 28 vezes mais potente que o CO_2 em um horizonte de 100 anos (FGV, 2022). Na contabilização das emissões no aterro, o IPCC (2006) sugere o método do Decaimento de Primeira Ordem, o qual assume que o componente orgânico degradável dos resíduos decai lentamente ao longo de algumas décadas, durante as quais são formados o CH_4 e o CO_2. A avaliação dessas emissões é uma etapa importante na tomada de decisão sobre o gerenciamento de resíduos de desastres, uma vez que, nessas situações, há aumento abrupto na geração de resíduos que, além de sobrecarregar os sistemas de coleta e limpeza urbana, pode intensificar as emissões em aterros sanitários.

Desastres naturais, dependendo de sua gravidade, podem gerar grandes quantidades de resíduos que necessitam de gestão adequada para não resultar em poluição ambiental e contribuir com agravos à saúde e ainda dificultar a recuperação das áreas afetadas e promover redução da resiliência comunitária (NADERI, 2024; MELLO, 2021). Um estudo sobre o evento de

chuvas intensas ocorrido no Espírito Santo em 2020, com foco nos RD, ressalta que os gestores públicos ainda tratam essas ocorrências como pontuais, sem a devida preparação para as atividades essenciais do período pós-desastre, revelando tanto a insuficiência de registros sobre os RD nos municípios analisados quanto a ausência de políticas públicas específicas para sua gestão (BRINGHENTI ET AL., 2023). O gerenciamento dos RD é etapa fundamental para recuperação das cidades afetadas por eventos extremos (ZHANG, 2019).

Em março de 2024, a região sul do Espírito Santo foi atingida por um evento de precipitação extrema, que provocou movimentos de massa e enxurradas em 13 municípios, os quais foram declarados em SE. Esse evento resultou em 20 óbitos, 583 pessoas desabrigadas e 26.390 desalojadas. A intensidade das chuvas resultou na geração de uma quantidade significativa de resíduos sólidos, que foram remanejados para depósitos temporários em cada cidade para destinação final futura. Dos municípios afetados, quatro deles (Alegre, Apiacá, Bom Jesus do Norte e Mimoso do Sul) receberam recursos financeiros para a destinação final dos resíduos na central de tratamento de resíduos da região, provenientes da Defesa Civil Nacional por meio da intermediação da Secretaria de Estado de Saneamento, Habitação e Desenvolvimento Urbano (SEDURB). Assim, esses quatro municípios foram selecionados como estudo de caso do presente trabalho. Essa pesquisa busca contribuir para aprimorar a gestão e o gerenciamento dos RD, considerando as dimensões sociais, econômicas e ambientais envolvidas.

Material e Métodos

O presente trabalho está inserido em estudo mais amplo sobre o gerenciamento de resíduos provenientes de desastres naturais hidrológicos no Espírito Santo; seu recorte explorou a avaliação das emissões de GEE na etapa de destinação final dos RD quando enviados a uma central de tratamento de resíduos. Para o estudo de caso, foram selecionados quatro municípios representativos do evento e que receberam recursos financeiros para o transporte e a destinação final dos RD, provenientes da Defesa Civil Nacional, por meio da intermediação da Secretaria de Estado de Saneamento, Habitação e Desenvolvimento Urbano (SEDURB). A análise foi baseada em dados secundários referentes à entrada de resíduos de desastres (RD) no aterro sanitário localizado em Cachoeiro de Itapemirim, unidade responsável pelo recebimento e disposição final dos resíduos provenientes dos municípios analisados. As informações foram obtidas por meio de solicitação direta ao órgão ambiental estadual (IEMA), com base na lei de acesso à informação, contemplando os registros de entrada de resíduos no aterro, durante o ano de 2024, que envolveu tanto os resíduos sólidos urbanos (RSU) quanto os resíduos decorrentes do evento extremo de março de 2024 (RD).

Os dados disponibilizados pelo IEMA, foram extraídos do Sistema Estadual Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR), instituído pelo Decreto Estadual nº 5.177-R, de 15 de julho de 2022 (ESPÍRITO SANTO, 2022). Esse sistema estadual, a partir de fevereiro de 2023, iniciou como facultativo, tornando-se obrigatório apenas em junho de 2024. O MTR permite a rastreabilidade da movimentação de resíduos no território do estado do Espírito Santo, permitindo a rastreabilidade e possibilitando a devolução da Declaração de Movimentação de Resíduos (DMR) aos geradores, após a destinação ter sido completada. Em função desse processo gradual de implementação, é provável que os dados referentes ao ano de 2023 e ao primeiro semestre de 2024 estejam sujeitos a subnotificação. No entanto, esse fato não afetou a pesquisa, pois a chegada dos RD provenientes do episódio de chuvas intensas dos quatro municípios estudados se deu a partir de agosto de 2024, de acordo com o próprio registro do IEMA e com dados de transporte disponibilizados pela Secretaria de Saneamento, Habitação e Desenvolvimento Urbano (SEDURB).

O cálculo das emissões de GEE teve por base a metodologia proposta pelo IPCC para aterros sanitários, por meio do modelo método do Decaimento de Primeira Ordem (IPCC, 2006). Como ferramenta de apoio aos cálculos, foi utilizada a planilha do Programa Brasileiro do GHG Protocol (PBGHG, 2025).

Para a estimativa das emissões no aterro sanitário, foi utilizada a massa total de resíduos destinados ao aterro em 2024, considerando tanto os resíduos sólidos urbanos (RSU) quanto os resíduos de desastres (RD). As emissões do aterro foram estimadas com uso da ferramenta do Programa Brasileiro GHG Protocol, cuja metodologia para resíduos sólidos aterrados adota os parâmetros do IPCC (FGV, s.d).

As Diretrizes para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (IPCC, 2006) recomenda utilizar o método de decaimento de primeira ordem (First Order Decay – FOD) para estimar as emissões de metano em aterros sanitários, por considerar a dinâmica temporal da decomposição dos resíduos. Diferentemente de abordagens simplificadas que assumem a geração instantânea de CH_4, o FOD parte do pressuposto que a decomposição da matéria orgânica ocorre progressivamente ao longo do tempo, sendo proporcional à quantidade de carbono degradável ainda disponível (Bogner e Matthews, 2003).

O modelo pode ser expresso pela equação:

$$Q_{CH_4}(t) = \sum_i [W_i \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot F \cdot k \cdot e^{-k(t-i)}], \qquad (1)$$

Onde: W_i representa a massa de resíduos disposta no ano i; DOC o carbono orgânico degradável; DOC_f a fração efetivamente decomposta; F a fração de metano no biogás; k a constante de decaimento; t o ano de cálculo.

Estimando-se um horizonte temporal de 25 anos de emissões para capturar a dinâmica de geração de metano ao longo desse período. A adoção desse horizonte é consistente com estudos que indicam que a maior parte das emissões de metano em aterros ocorre nas primeiras três décadas após a disposição dos resíduos, embora o processo possa se estender por períodos mais longos, como apontado pela United States Environmental Protection Agency – USEPA (2023).

Para relacionar a emissão total do aterro às emissões associadas aos RD, foi determinado o fator médio de emissão por tonelada de resíduo, expresso pela equação:

$$Emissão_{RD} = \frac{Emissão_{T\ aterro}}{RSU+RD} \times RD \quad (2)$$

Onde: $Emissão_{RD}$ é a emissão associada aos resíduos de desastres (tCO_2e), $Emissão_{T\ aterro}$ é a emissão total do aterro (tCO_2e), RSU é a massa de resíduos sólidos urbanos (t) e RD é a massa de resíduos de desastres (t).

A ausência de uma caracterização físico-química específica dos resíduos de desastre gerados impossibilitou a determinação acurada de sua fração biodegradável e, consequentemente, de seu potencial efetivo de geração de metano no aterro. Diante dessa limitação optou-se por tratar os RD metodologicamente como resíduos sólidos urbanos (RSU) no cálculo das emissões. Essa limitação também é encontrada em outros estudos, a qual aponta a carência de dados confiáveis sobre a composição dos resíduos de desastres como uma das principais restrições para análises mais robustas do tema (ZHANG et al., 2019). Em adição, a ausência de dados sobre a recuperação de metano, adotou-se que não há nenhum processo de recuperação energética do biogás, abordagem conservadora que pode superestimar as emissões de CH_4, uma vez que a recuperação constitui importante mecanismo de mitigação em aterros (Bogner e Matthews, 2003).

Resultados e Discussão

No ano de 2024, o aterro sanitário analisado recebeu, o total de 176.174,49 toneladas de resíduos sólidos, sendo 101.107,62 toneladas de RD e 75.066,87 toneladas de RSU, como detalhado na Tabela 1. Nota-se que os RD representaram 57,4% do total de resíduos destinados ao aterro nesse ano, ultrapassando o montante de RSU anual destinado ao mesmo aterro. Destaca-se, ainda, que essa fração resultante dos efeitos do desastre hidrológico que afetou a região no verão de 2024, foi destinada ao aterro em um curto intervalo de tempo, cerca de 30 dias, o que impactou sua rotina de funcionamento, podendo ser caracterizada por um pico abrupto de disposição. Por sua vez os RSU, que correspondem a 42,6% do total, apresentam geração contínua ao longo de todo o ano.

A distribuição dos resíduos por município evidencia a predominância de Mimoso do Sul na geração de RD, município que foi fortemente impactado e com maior número de óbitos e danos à infraestrutura urbana, com 75.746,94 toneladas, seguido por Apiacá, Alegre e Bom Jesus do Norte (Tabela 1). Somente em um município (Alegre), a massa de RD depositada no aterro não ultrapassou o montante anual de RSU gerado em cada município.

Município avaliado - estudo de caso	Massa RD (t; %) - 2024	Massa RSU (t; %) - 2024
Mimoso do Sul	75.746,94 (61,8%)	46.883,3 (38,2%)
Bom Jesus do Norte	5.989,38 (53,4%)	5.216,86 (46,6%)
Apiacá	11.616,96 (58,7%)	8.178,73 (41,3%)
Alegre	7.754,34 (34,4%)	14.787,98 (65,6%)
TOTAL	101.107,62 (57,4%)	75.066,87 (42,6%)

Tabela 1: Quantitativo de RD e de RSU destinados ao aterro sanitário regional, por município, 2024. Fonte: Elaborado pelas autoras a partir de dados do IEMA (2024)

As emissões de gases de efeito estufa associadas ao total de resíduos dispostos no aterro sanitário (RSU + RD) apresentaram um pico inicial, nos primeiros anos após a disposição, seguido de uma redução gradual ao longo do tempo, conforme indicado na Figura 1. Esse comportamento reflete a dinâmica de decomposição da fração orgânica e evidencia o potencial de emissão, ao longo dos 25 anos analisados. O cálculo das emissões indicou o total de 219.221,44 tCO_2e para o conjunto de resíduos (RSU + RD) e de 125.812,53 tCO_2e para os resíduos de desastres (RD), o que representa 57,4% do total emitido. Sem a contribuição dos RD, ou seja, o aterro sanitário operando para sua função precípua, as emissões estimadas seriam de aproximadamente 93.408,91 tCO_2e, evidenciando a contribuição expressiva dos RD no total de emissões de GEE. A estimativa indica um aumento de 34,69% nas emissões de GEE do aterro, associado à incorporação dos resíduos de desastres (RD).

Observa-se que a participação percentual dos RD nas emissões totais é equivalente à sua participação na massa total de resíduos disposta, evidenciando uma proporcionalidade direta entre massa e emissões. Esse resultado decorre da premissa metodológica adotada, na qual os RD foram considerados com características semelhantes às dos resíduos sólidos urbanos (RSU), assim, quando houver uma caracterização que indique o % de orgânicos nos RD, esse cálculo poderá ser aprimorado.

Esse resultado reforça a relevância dos RD como fonte significativa de emissões de GEE, considerando-se ainda que, no geral, seu montante é maior que a própria geração de RSU do município. Esse é tema ainda pouco explorado na literatura, que aponta a necessidade de maior aprofundamento em análises ambientais associadas ao gerenciamento desses resíduos (ZHANG et al., 2019).

Brown et al. (2011) indicam que a geração de RD, em apenas um único evento extremo, pode alcançar de 5 a 15 vezes a geração anual de RSU de uma comunidade, em condições normais. De forma semelhante, Zhang et al. (2019) destacam que esses aumentos expressivos tendem a sobrecarregar os sistemas de gestão, exigindo adaptações operacionais significativas. No entanto, os resultados deste estudo indicam um comportamento distinto, pois, embora em três municípios a geração de RD tenha suplantado o valor da geração anual de RSU, não chegou a dobrar o montante. Em Mimoso do Sul, município mais afetado, esse valor chegou a 23,6% a mais, enquanto em Alegre, ficou 31,2% abaixo. Contudo, a codisposição praticada foi suficiente para provocar impacto expressivo nas emissões de GEE associadas à disposição final e pode comprometer a operação de aterros sanitários devido às condições em que os RD se apresentam no momento da disposição final conjunta.

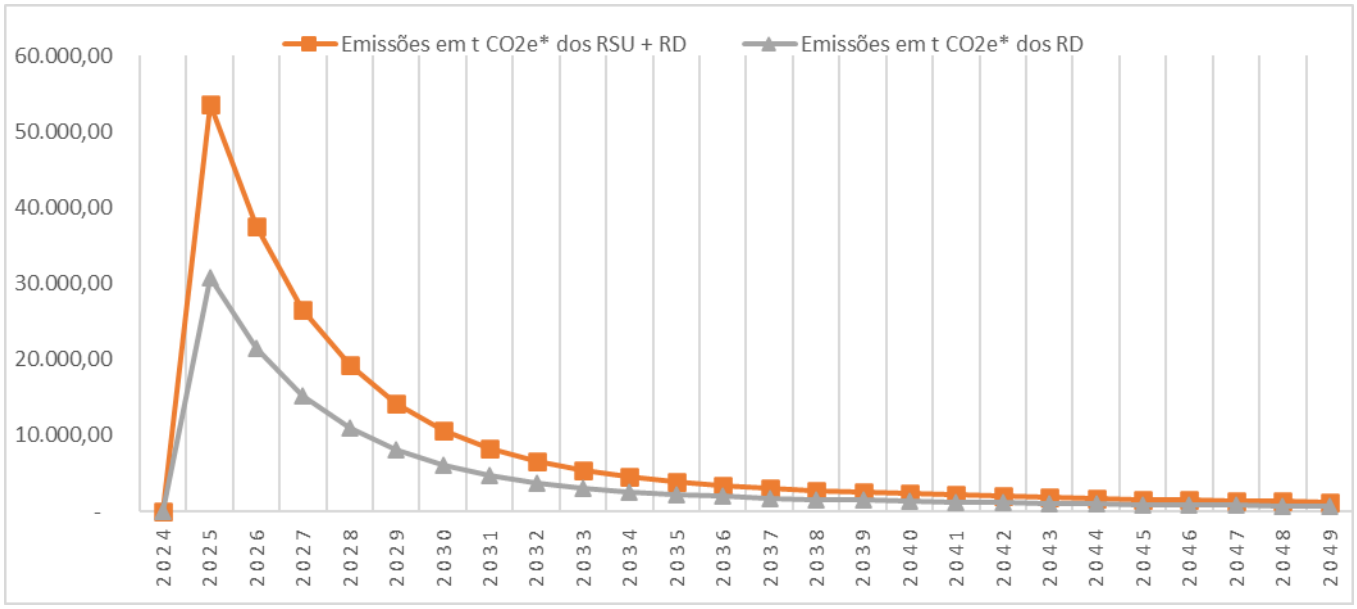


Figura 1: Simulação das emissões de CO_2 *, pela massa total de resíduos (RSU + RD) e pelos RD, para os quatro municípios estudados.
Fonte: Elaborado pelas autoras

Adicionalmente, a análise das emissões por município evidencia diferenças significativas na contribuição de cada localidade ao longo do horizonte temporal adotado (Figura 2). Observa-se que Mimoso do Sul apresenta as maiores emissões ao longo de todo o período analisado, com pico acentuado nos primeiros anos após a disposição, seguido de redução gradual. O aumento significativo das emissões associadas aos resíduos de desastres também foi observado em estudos que consideram a avaliação do ciclo de vida do sistema de gestão, nos quais cenários com maior geração de resíduos implicam elevação expressiva das emissões e dos custos operacionais (Wakabayashi et al., 2017).

A concentração de grande quantidade de resíduos em curto período, observada neste estudo, está associada a desafios operacionais semelhantes aos discutidos por Wakabayashi et al. (2017), que destacam a necessidade de adaptação da infraestrutura para lidar com picos abruptos de geração de resíduos e que podem reduzir significativamente a vida útil dos aterros. Zhang et al (2019) reforçam a necessidade de maior atenção com o prévio planejamento para demandas emergenciais de resíduos.

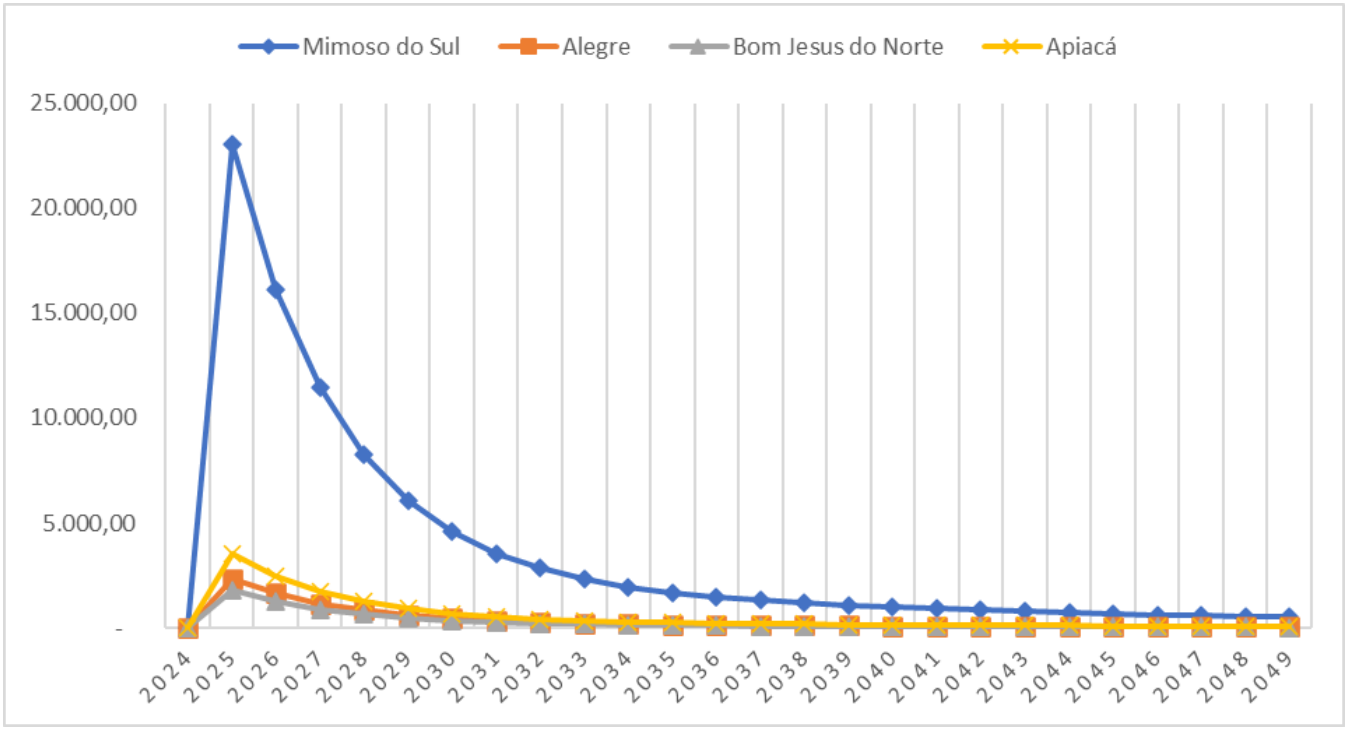


Figura 2: Simulação das emissões de CO_2 e*, devido à destinação de RD no aterro sanitário, por município estudado
Fonte: Elaborado pelas autoras

Nesse sentido, embora o presente estudo se concentre na etapa de disposição em aterro, os resultados indicam que a incorporação dos RD implica em aumento significativo no potencial de emissões de GEE, o que sugere impactos ainda mais elevados quando consideradas todas as etapas do ciclo de vida dessa tipologia de resíduo. Ademais, a dificuldade de caracterização dos resíduos e a ausência de dados detalhados, observadas neste estudo, estão alinhadas com as lacunas apontadas por Zhang et al. (2019), que destacam a carência de informações sobre quantidade e composição dos resíduos de desastres como um dos principais entraves para avaliações mais robustas.

Considerações Finais

Os resultados evidenciam que a destinação de RD gerados em eventos extremos hidrológicos, como o analisado neste estudo de caso, ocasiona aumento abrupto no quantitativo de resíduos sólidos para envio a aterro sanitário, alterando sua dinâmica de recepção e operação e ampliando os potenciais impactos, como é o caso das emissões dos GEE. Esse comportamento contribui ainda para elevação das emissões de GEE nos anos subsequentes à disposição, reforçando a importância de se buscar rotas alternativas para esses resíduos. Assim, os achados reforçam a necessidade de planejamento prévio e se praticar a gestão integrada de RD aos demais resíduos municipais e salientam, ainda, a relevância de estudos que incorporem análises ambientais mais abrangentes.

Por fim, este trabalho contribui ao evidenciar a relevância do aprimoramento dos sistemas de registro, caracterização e gestão dos resíduos de desastres. Estudos futuros podem aprofundar a análise de sua composição e avaliar estratégias de mitigação, como a valorização e/ou a recuperação energética e alternativas à disposição em aterros sanitários.

Destaca-se que o presente estudo avaliou especificamente a etapa de disposição final, sendo recomendada a realização de abordagens mais abrangentes integrando etapas de remoção, transporte e tratamento/valorização, devido à sua influência significativa nas emissões totais do sistema (Wakabayashi et al., 2017).

Referências Bibliográficas

BOGNER, Jean et al. Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. Working Group III (Mitigation). Waste Management & Research, v. 26, n. 1, p. 11–32, fev. 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1177/0734242X07088433.

BOGNER, Jean; MATTHEWS, Elaine. Global methane emissions from landfills: New methodology and annual estimates 1980–1996. *Global Biogeochemical Cycles*, [S.l.], v. 17, n. 2, p. 1065, 2003. DOI: 10.1029/2002GB001913.

BRASIL. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS Brasil). Indicador 11.b.2: proporção de governos locais que adotam e implementam estratégias de redução de risco de desastres. Brasília, DF: IPEA, [s.d.]. Disponível em: https://odsbrasil.gov.br/objetivo11/indicador11b2. Acesso em: 31 mar. 2026.

BROWN, C.; MILKE, M.; SEVILLE, E. Disaster waste management: a review article. Waste Management, v. 31, p. 1085–1098, fev. 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.027

BRINGHENTI, Jacqueline R.; et al. Gestão de resíduos de desastres: análise do evento de chuvas intensas ocorrido no Espírito Santo em 2020. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (CNM). *Panorama dos desastres no Brasil: 2013 a 2024*. Brasília, DF: CNM, 2025. Disponível em: https://cnm.org.br/storage/biblioteca/2025/Estudos_Tecnicos/ET_DEFCIVIVL_05-2025_Panorama_dos_Desastres_no_Brasil_2013_a_2024.pdf

ESPÍRITO SANTO (Estado). Decreto nº 5.177-R, de 15 de julho de 2022. Institui o Sistema Estadual On-line de Manifesto de Transporte de Resíduos Sólidos no Espírito Santo – Sistema MTR-ES. Diário Oficial do Estado do Espírito Santo, Vitória, ES, 18 jul. 2022. Disponível em: https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=434115

FGV. Fundação Getulio Vargas. Valores de referência para o potencial de aquecimento global (GWP) dos gases – versão 2.0. Nota técnica, 02 mar. 2022. Disponível em: http://www.fgv.br/ghg

FGV. Fundação Getulio Vargas. Comunicado sobre atualização da ferramenta do Programa Brasileiro GHG Protocol. São Paulo: FGV, [s.d.]. Disponível em: https://eaesp.fgv.br/sites/eaesp.fgv.br/files/u641/comunicado_ferramenta.pdf

IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Japan: IGES, 2006.

IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report – Summary for Policymakers. Geneva: IPCC, 2023.

JAIN, P. C. Greenhouse effect and climate change: scientific basis and overview. Renewable Energy, v. 3, n. 4–5, p. 403–420, 1993.

MELLO, D. P.; BRINGHENTI, J. R.; BIANCHI, D. P. Z.; MONTE, L. S.; GÜNTHER, W. M. R. Disaster waste: characterization and quantification applied to an intense rain event. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, v. 56, n. 3, p. 517–530, 2021. DOI: https://doi.org/10.5327/Z217694781007

MYHRE, G. et al. Anthropogenic and natural radiative forcing. In: STOCKER, T. F. et al. (eds.). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

NADERI, Azra et al. Identifying methods and challenges of waste management in natural disasters. Journal of Environmental Management, v. 373, 2025, 123514. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123514

PBGHG. Programa Brasileiro GHG Protocol. Ferramenta de cálculo do PBGHG 2025. v. 2025.0.1. São Paulo, 2025. Disponível em: https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSfJ6SIy0N-q8AGH1LAIMIE2VDKudK-ajqF1wevtIcYS-4ttJg/viewform

REIS JUNIOR, Neyval Costa et al. Mudanças climáticas: efeitos sobre o Espírito Santo. 1. ed. Jundiaí: Paco, 2023. Disponível em: https://www.pacolivros.com.br/mudancas-climaticas-efeitos-sobre-o-espirito-santo

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Quantifying methane emissions from landfilled food waste. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2023.

ZHANG, C.; CAO, S.; LI, Y.; LIU, X.; HUISINGH, D. A systematic review of recent developments in disaster waste management. *Journal of Cleaner Production*, v. 235, p. 822–840, 2019.

MULTISCALE CLIMATE VULNERABILITY ASSESSMENT IN SÃO PAULO STATE FOR CLIMATE ADAPTATION PLANNING

1 Danúbia Caporusso Bargos, 2 Yuri Monteiro Herculano, 3 Filipe Leone Coimbra Silva, 4 Fabiano Fernandes Bargos

1 Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo (EEL/USP), danubiacbargos@usp.br; 2 Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo (EEL/USP), yuri.herculano@usp.br; 3 Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo (EEL/USP), filipe.leone@usp.br; 4 Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo (EEL/USP), fabianobargos@usp.br

Keywords: Climate change adaptation; Composite index; Spatial analysis

Abstract

Climate change poses significant challenges to densely populated and economically dynamic regions. This study presents an integrated, multiscale assessment of climate vulnerability across municipalities in São Paulo State, Brazil, combining climatic indicators, socio-environmental conditions, public health data, and institutional capacity variables. A Climate Vulnerability Index (CVI) was developed using multivariate statistical techniques and spatial analysis to characterize patterns of exposure, sensitivity, and adaptive capacity. The analysis was conducted at two complementary spatial scales: the municipal scale, enabling the identification of local contrasts and intra-state inequalities, and the regional scale, through aggregation by Water Resources Management Units (WRMUs), providing a broader territorial perspective of vulnerability. The results reveal pronounced spatial heterogeneity, with clusters of high vulnerability associated with elevated surface temperatures, urban heat island intensity, socioeconomic inequalities, and limited institutional preparedness. In contrast, municipalities with stronger governance structures and environmental planning instruments exhibit lower vulnerability levels. These findings highlight the importance of integrated public policies and nature-based solutions in strengthening climate resilience. The proposed framework is replicable and provides a consistent basis for subnational vulnerability assessment, supporting evidence-based decision-making for climate adaptation planning.

Introduction

Climate change has emerged as one of the most pressing contemporary challenges for environmental governance and the promotion of urban sustainability in the twenty-first century. As highlighted in the Sixth Assessment Report (AR6) of the Intergovernmental Panel on Climate Change, the global mean surface temperature has already increased by approximately 1.1°C relative to pre-industrial levels, contributing to the intensification, in both frequency and magnitude,of extreme events such as heatwaves, heavy precipitation, droughts, and compound climate risks (IPCC, 2023). These risks, however, are not distributed uniformly, as they are shaped by socioeconomic inequalities, development patterns, environmental degradation, and institutional response capacity. In this context, the international climate agenda has gained prominence within the United Nations 2030 Agenda, particularly through Sustainable Development Goals (SDGs) 3, 11, and 13, which address health and well-being, sustainable cities, and climate action (UN, 2015).

Urban areas are particularly vulnerable to the impacts of climate change. High built density, combined with population concentration and complex infrastructure systems, increases exposure to climate hazards and exacerbates systemic vulnerability. Among the main urban risks, extreme heat stands out as one of the most immediate and potentially lethal threats. The interaction between global warming and the Urban Heat Island (UHI) effect intensifies thermal stress by raising average urban temperatures and reducing nighttime cooling (ZHAO et al., 2018; IPCC, 2022). Recent studies indicate that this process has already contributed to increased heat-related mortality, particularly in highly urbanized regions (VICEDO-CABRERA et al., 2021). Moreover, these impacts are unevenly distributed across populations, being further aggravated by socioeconomic inequalities, housing conditions, access to green infrastructure, and public health vulnerabilities (HSU et al., 2021; CHAKRABORTY et al., 2020).

Recent literature has increasingly adopted the exposure–sensitivity–adaptive capacity framework, conceptualizing vulnerability as the result of interactions between climate hazards and the structural characteristics of societies (IPCC, 2022). Within this perspective, composite indices have emerged as a key methodological approach for spatial assessment and decision support, particularly at subnational scales (DE SHERBININ et al., 2021; TONMOY et al., 2014).

In the Brazilian context, climate adaptation is supported by regulatory frameworks such as the National Policy on Climate Change, the National Urban Afforestation Plan (PlaNAU), and, in the state of São Paulo, the State Climate Change Policy, the São Paulo Resilient Municipalities Program, and the State Plan for Climate Adaptation and Resilience (PEARC). Nevertheless, the effectiveness of these policies depends on their incorporation into municipal governance and on the availability of robust indicators to support local decision-making (DI GIULIO, 2024; BARBI, 2014; LEMOS et al., 2025).

The state of São Paulo illustrates the challenges of climate adaptation in highly urbanized and unequal contexts. Recent studies indicate increasing frequency and intensity of extreme heat events, greater hydrological variability, and intensification of compound climate risks in southeastern Brazil (MARENGO et al., 2021). At the same time, municipalities display heterogeneous socioeconomic conditions and institutional capacities, leading to uneven adaptation patterns across the territory.

In this context, this study develops a Municipal Climate Vulnerability Index for the state of São Paulo, integrating indicators of climate exposure, socio-environmental sensitivity, public health, and institutional capacity. The objective is to identify spatial patterns of vulnerability and adaptive capacity, providing evidence-based support for climate adaptation planning and strengthening subnational governance in the face of escalating climate risks.

Materials and Methods

The Climate Vulnerability Index (CVI) developed in this study is grounded in the conceptual framework proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), which defines vulnerability as the outcome of the interaction among three core dimensions: exposure, sensitivity, and adaptive capacity. This framework has been widely adopted in climate risk and vulnerability assessments, as it enables an integrated understanding of the multiple factors shaping territorial susceptibility to climate-related impacts. The methodological procedure began with a comprehensive review of both national and international literature on climate vulnerability assessment. This initial stage resulted in the identification of approximately 600 variables potentially associated with the phenomenon under investigation. Subsequently, a multi-stage screening and refinement process was conducted to define the final set of indicators. First, variables exhibiting conceptual overlap, statistical redundancy, or limited analytical relevance were excluded. Next, the remaining indicators were evaluated based on data availability, consistency, and temporal reliability, ensuring both the empirical robustness and operational feasibility of the index at the municipal scale. At this stage, consolidated secondary databases, such as AdaptaClima, MapBiomas, and DATASUS, were used both to replace unavailable or outdated indicators and to incorporate variables capable of capturing territorial specificities of the state of São Paulo. At the end of this process, a total of 28 variables were selected and organized according to the three dimensions of the IPCC framework, forming the Exposure, Sensitivity, and Adaptive Capacity sub-indices (Table 01).

Considering the heterogeneity of the selected indicators in terms of scale and units of measurement, a data normalization procedure was applied to ensure comparability across variables and to avoid distortions in the construction of the composite index. As highlighted by Mingoti (2007), normalization constitutes a fundamental step in multivariate analyses that integrate indicators of different natures.

Table 01 – Indicators used in the calculation of the CVI.

	Indicator	Source	Year
Adaptive Capacity	With Contingency Plan	IBGE - MUNIC	2020
	With Municipal Civil Protection and Defense Coordination (COMPDEC) or Equivalent Agency	IBGE - MUNIC	2020
	Existence of Risk Registry	IBGE - MUNIC	2020
	Existence of Monitoring and Enforcement Mechanisms to Prevent Settlement in Disaster-Prone Areas	IBGE - MUNIC	2020
	With Housing Program for Relocation of Low-Income Population from Risk Areas	IBGE - MUNIC	2020
	Existence of Natural Disaster Mapping	IBGE - MUNIC	2020
	With Master Plan (Urban Planning Plan)	IBGE - MUNIC	2021
	Participation in Resilient Cities Program (Energy Security and Access)	Adapta Clima	2015
	Environmental Governance	Adapta Clima	2020
	Housing Governance	Adapta Clima	2020
	Sanitation Governance	IBGE - MUNIC	2023
	GreenBlue City Program (PMVA) Score	SEMIL	2023
	With Municipal Human Rights Council	IBGE - MUNIC	2023
Exposiure	Exposure Index (Hydro-Related Flood Disasters)	Adapta Clima	2015
	Landslide Hazard Index (Hydro-Related Disasters)	Adapta Clima	2015
	Flood, Flash Flood, and Inundation Hazard Index (Hydro-Related Disasters)	Adapta Clima	2015
	R95p (Annual Precipitation from Very Wet Days)	INMET	2008 a 2023
	CDD (Consecutive Dry Days)	INMET	2008 a 2023
	Total_Days_TEM_INS_5+	INMET	2008 a 2023
	Temperature Trend Coefficient (Slope)	INMET	2008 a 2023
Sens	Primary and Secondary Vegetation Loss	IPS 2025	2025
	Urban Green Areas	MapBiomas	2022
	Dependency Ratio	Calculated by the authors based on data from Demographic Census (IBGE 2022)	2022

i b i l i t y	Share of Agricultural Value Added in Total Value Added (%)	IBGE - Produto Interno Bruto dos Municípios	2021
	Variation in Chronic Disease Incidence	Calculated by the authors based on data from DATASUS	2002 a 2024
	CVD Vulnerability Index (IVCAD)	IPS 2025	2025
	Municipal Development Index (IFDM Total)	Firjan	2023
	Access to Information and Communication	IPS 2025	2025

To this end, the Min–Max normalization method was adopted, which is widely used in climate vulnerability studies (QUINTÃO et al., 2017; SIMANE; ZAITCHIK; FOLTZ, 2014; PANDEY; JHA, 2011). This method rescales observed values to a continuous range between 0 and 1, preserving their relative distribution.

For indicators that are positively associated with vulnerability i.e., when higher values indicate greater vulnerability the following equation was applied:

$$\frac{X_n=(X_i-X_{min})}{(X_{max}-X_{min})}, \quad (01)$$

where X_n represents the normalized value, X_i corresponds to the observed value for the municipality i, X_{max} and X_{min} denote the maximum and minimum values of the variable within the study area, respectively.

For indicators inversely related to vulnerability where higher values represent more favorable conditions and, therefore, lower vulnerability the inverse form of normalization was applied:

$$\frac{X_n=(X_{max}-X)_i}{(X_{max}-X_{min})}. \quad (02)$$

This distinction is essential to ensure the interpretative consistency of the index, so that, after normalization, higher values systematically correspond to higher levels of vulnerability. Subsequently, the sub-indices corresponding to each analytical dimension were calculated using the simple arithmetic mean of the normalized variables included in each group:

$$Subindex = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}, \quad (03)$$

while n is the total number of variables composing each dimension.

The final Climate Vulnerability Index was then estimated by aggregating the three sub-indices, also using the simple arithmetic mean, as expressed by the following equation:

$$IVC = \frac{Adaptive\ Capacity+Exposure+Sensibility}{3}. \quad (04)$$

The decision to assign equal weight to each dimension was made to preserve the analytical neutrality of the model, giving the same level of importance to the different components of climate vulnerability.

After calculation, the results were classified into five interpretative categories to facilitate comparisons among municipalities: very low (0.00–0.20), low (0.20–0.40), medium (0.40–0.60), high (0.60–0.80), and very high (0.80–1.00).

The analysis of the results was conducted at two complementary scales: the municipal scale, allowing the identification of local contrasts and intrastate inequalities, and the regional scale, through aggregation by Water Resources Management Units (WRMUs), to understand vulnerability from a broader territorial perspective.

Finally, the results were spatialized through the creation of thematic maps in ArcGIS, enabling the identification of spatial patterns, critical areas, and territorial disparities in climate vulnerability among municipalities and across the different WRMUs in the state.

Study Area

The study area for this research corresponds to the state of São Paulo, located in the southeastern region of Brazil. As the most populous state in the country, São Paulo has approximately 44.4 million inhabitants distributed across 645 municipalities, encompassing a territorial area of around 248,000 km² (IBGE, 2022). These characteristics confer a high level of socio-spatial complexity, making the state particularly relevant for analyses at both regional and municipal scales.

From a demographic and urban perspective, São Paulo exhibits strong population concentration, especially within the São Paulo Metropolitan Region, one of the largest urban agglomerations in the world (IBGE, 2024). Intense urbanization, combined with high population density and the expansion of the urban footprint, has generated significant pressures on infrastructure, water resources, and environmental systems, creating a highly sensitive context to the effects of climate change (Lima et al., 2018; Gesualdo et al., 2019).

The state's territorial organization reveals substantial spatial contrasts between the metropolis, regional urban hubs in the interior, and areas with lower population density. Regions such as Campinas, Baixada Santista, Vale do Paraíba, and Ribeirão Preto concentrate strong economic and demographic dynamics, whereas areas in western São Paulo display distinct patterns of settlement and land use. This territorial heterogeneity is a key element for understanding socio-environmental inequalities and the varying levels of vulnerability among municipalities (Torres et al., 2021).

From an environmental perspective, São Paulo has undergone profound changes in land cover and land use throughout the 20th century due to urban expansion, industrialization, and the growth of agricultural and livestock activities, particularly in coastal areas, metropolitan regions, and the expanding interior. This process has led to a significant reduction in native vegetation, with remnants primarily concentrated in mountainous areas, along the coast, and within conservation units, where they play a

critical role in local climate regulation, biodiversity conservation, and the provision of essential ecosystem services (Silva et al., 2018; Daunt et al., 2021).

In this context, the state of São Paulo represents a strategic study area for climate vulnerability analysis, as it combines high population density, intense urbanization, environmental diversity, and pronounced territorial inequalities. These characteristics make the territory particularly suitable for investigating how socioeconomic, demographic, and environmental factors influence exposure, sensitivity, and adaptive capacity in the face of climate change impacts (Young; Nobre, 2012). The diversity of environmental conditions, development trajectories, and institutional arrangements observed in the state provides a robust basis for examining how the dimensions of exposure, sensitivity, and adaptive capacity interact to shape climate vulnerability and extreme event risks. Consequently, the study area holds not only analytical relevance but also applied potential, as it can inform the development of spatially oriented decision-support tools that are adaptable to other regions facing similar challenges related to urbanization, inequality, and climate risk.

Results and Discussion

The results of the Climate Vulnerability Index (CVI) reveal a markedly heterogeneous spatial distribution of vulnerability across the municipalities of São Paulo State, highlighting significant territorial contrasts in how climate risks manifest and are addressed locally (Figure 01). It was observed that 20% of municipalities (129) fall within the very high vulnerability class, while 28% (181) exhibit low or very low vulnerability levels. The spatial configuration of the index indicates a relatively consistent north–south gradient, suggesting that socioeconomic, institutional, and environmental inequalities directly influence the distribution of climate risk. This pattern aligns with previous studies highlighting strong regional asymmetries in adaptive capacity within the state (Torres et al., 2021). Although most municipalities (52%) fall within the medium vulnerability range, this result should be interpreted cautiously, as intermediate values may obscure distinct combinations of exposure, sensitivity, and adaptive capacity. Analytically, this finding underscores the importance of disaggregating the index into its constituent dimensions, as municipalities with identical aggregate values may exhibit markedly different structural vulnerabilities. A comparison of extremes illustrates this dynamic: municipalities such as Valinhos, Americana, and Nova Odessa show lower vulnerability, whereas locations like Cachoeira Paulista, Piquerobi, and Presidente Bernardes concentrate higher levels, reflecting more critical combinations of climate exposure, socioeconomic limitations, and lower institutional readiness.

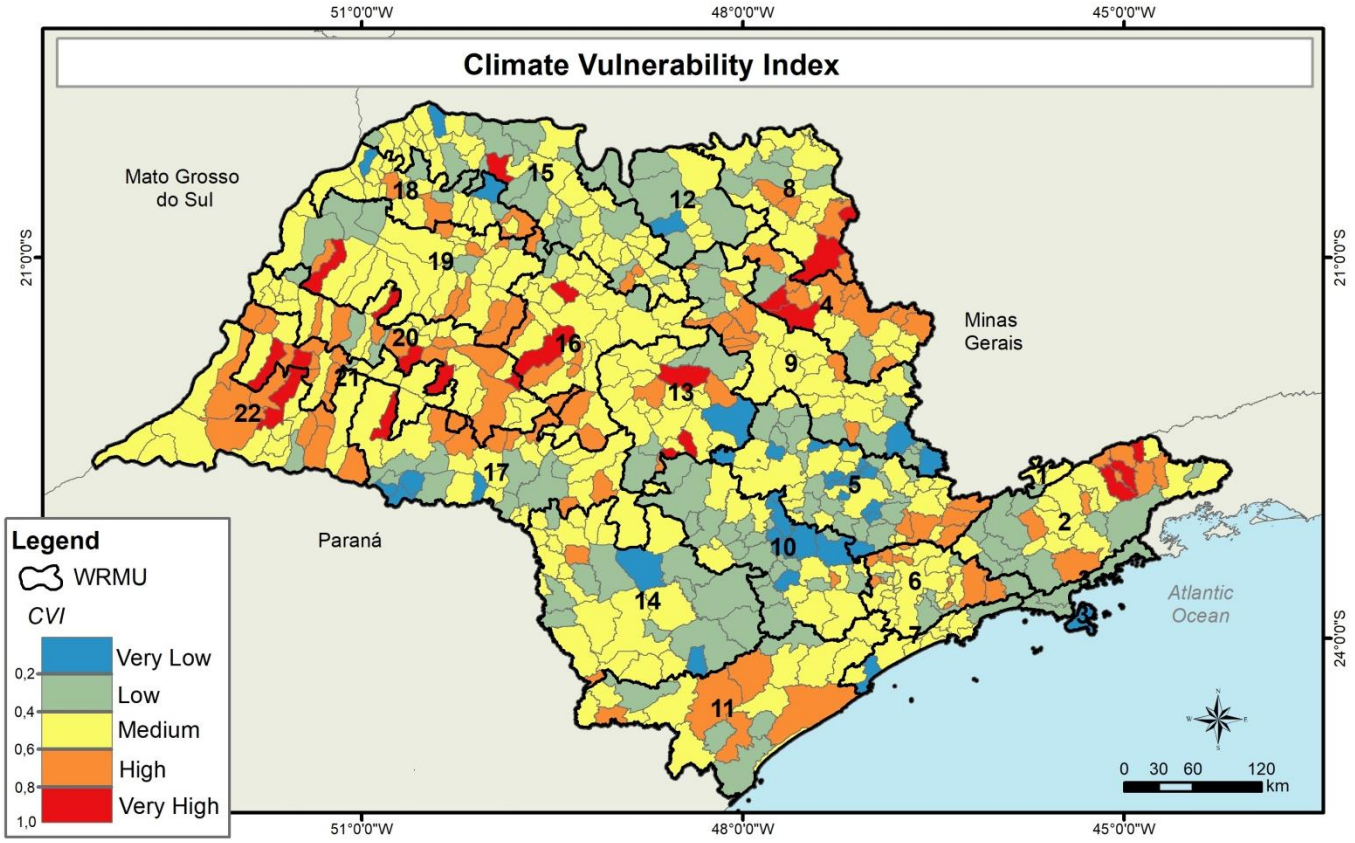


Figure 01 – Climate Vulnerability Index for São Paulo municipalities. Warmer colors indicate higher vulnerability.

The institutional dimension emerges as a central factor in explaining these differences. Less vulnerable municipalities stand out not only for having formal civil protection structures but also for possessing specific plans, response protocols, and more consolidated preventive instruments. Conversely, in highly vulnerable municipalities, institutional structures appear less developed or poorly coordinated. This outcome reinforces the notion that climate adaptation relies less on the nominal existence

of administrative structures and more on the effectiveness of their implementation and integration into territorial planning, in line with adaptive governance literature (Bulkeley & Betsill, 2013).

From an environmental governance perspective, the results also suggest a consistent relationship between lower vulnerability and stronger institutional performance. Municipalities with lower CVI values achieved higher scores in the Green and Blue Municipality Program (PMVA) and exhibited greater urban green space coverage, reflecting more established practices in environmental planning and green infrastructure. These elements are particularly relevant in urban contexts, as they contribute to heat island mitigation, improved drainage, and enhanced resilience to extreme events (Rosenzweig et al., 2018).

The socioeconomic dimension reinforces this interpretation. The most vulnerable municipalities scored lower on the Firjan Municipal Development Index (IFDM), particularly in the health component, indicating significant weaknesses in responding to climate impacts with health repercussions, such as heatwaves, flooding, and climate-sensitive diseases. This finding becomes even more relevant when linked to spatial temperature distribution, as 58% of highly vulnerable municipalities coincide with areas of higher temperatures, especially in the western portion of the state, where warming and climate variability effects are more pronounced.

When analyzing the Water Resources Management Units (WRMUs), CVI distribution highlights persistent regional inequalities (Figure 02). Units 4 and 21 concentrate the highest proportion of municipalities classified in the high and very high vulnerability categories, with Unit 21 showing approximately half of its municipalities in the high class and 8% in the very high class, and Unit 4 presenting 39.1% of municipalities in high and 13.0% in very high vulnerability.

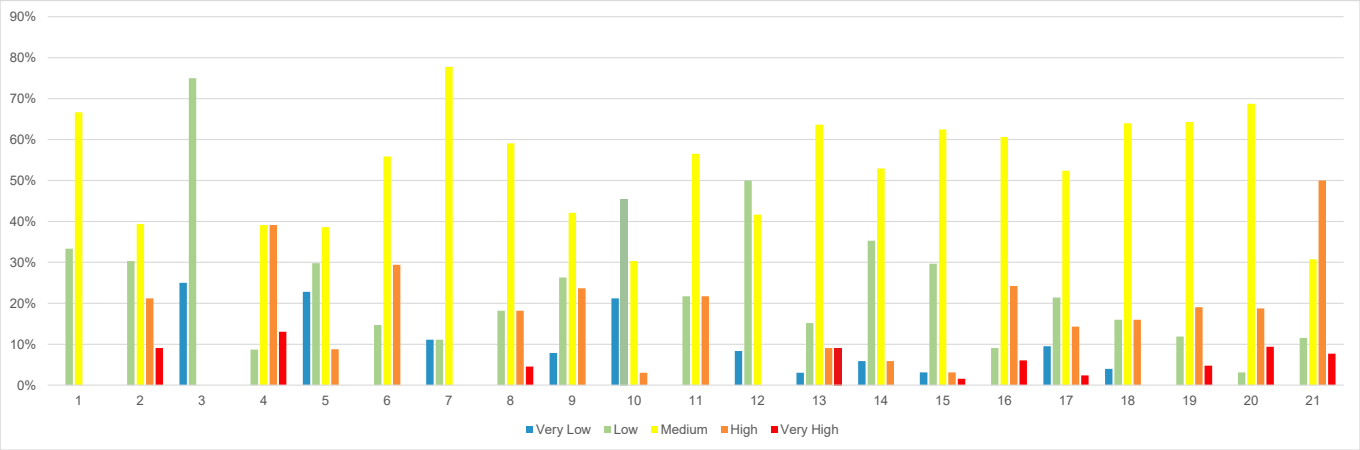


Figure 02 – Percentage distribution of municipalities by CVI class across WRMUs. The x-axis represents WRMUs, and the y-axis shows the percentage of municipalities.

In contrast, Units 3, 5, 10, and 12 are dominated by municipalities with low vulnerability, with Unit 3 standing out at 75.0% low and 25.0% very low, and Unit 10 having 45.5% of municipalities in the low class. Several other units, including WRMUs 1, 7, 13, 18, 19, and 20, exhibit a predominance of municipalities in the medium class (>63%), suggesting intermediate regional contexts characterized by distinct combinations of exposure, sensitivity, and adaptive capacity. These findings indicate that regional factors, such as economic structure, water availability, urbanization patterns, and institutional capacity, play a decisive role in shaping the spatial configuration of the index, while also demonstrating the usefulness of WRMU-level analysis for identifying territorial vulnerability patterns at a regional scale.

Subindex analysis provides a more precise understanding of the mechanisms underlying the aggregate index (Figure 03). Adaptive capacity values were highest in the Metropolitan and Greater Metropolitan São Paulo regions, as well as in municipalities with denser urban infrastructure and stronger institutional indicators. Conversely, municipalities heavily dependent on agriculture and with lower economic diversification exhibited the lowest adaptive capacity levels, indicating heightened susceptibility to prolonged droughts and thermal variability.

The Exposure subindex identified critical areas in the Metropolitan São Paulo region, Vale do Paraíba, and Baixada Santista, where high population density and infrastructure concentration amplify climate risks. Interestingly, these municipalities also tend to show higher adaptive capacity indicators, suggesting that historical exposure to extreme events may have strengthened institutional frameworks and the adoption of mitigation and response policies. This highlights a complex relationship between exposure and resilience, where accumulated experience functions as a driver of territorial learning.

An additional aspect worth noting is the seemingly paradoxical behavior in some of the most exposed municipalities. Despite higher potential risk due to population density, intense urbanization, and concentrated infrastructure, these areas exhibit relatively elevated adaptive capacity. This pattern indicates that exposure, while central to climate risk, can also drive institutional strengthening and the consolidation of territorial management tools. In other words, historical recurrence of extreme events appears to have stimulated the development of more structured prevention, monitoring, and adaptation responses, transforming accumulated experience into territorial resilience.

In contrast, municipalities currently exhibiting lower immediate exposure, particularly in interior areas with higher reliance on agriculture, may display prospective vulnerabilities not fully captured by the aggregate index. Dependence on

climate-sensitive productive activities, such as crop and livestock farming, suggests increased susceptibility to prolonged droughts, thermal fluctuations, and water scarcity, particularly under future climate change scenarios. This underscores the importance of incorporating temporal and preventive perspectives into CVI interpretation, highlighting that seemingly favorable present conditions do not necessarily correspond to lower future vulnerability.

The Sensitivity subindex showed higher values concentrated in the Southern São Paulo coast, especially in the Ribeira do Iguape/Litoral Sul WRMU. In this case, sensitivity appears more closely linked to structural, socioeconomic, and environmental fragilities than to the immediate frequency of extreme events. More sensitive municipalities exhibited poorer sanitation, water management, and vegetation coverage indicators, reinforcing the notion that climate vulnerability is strongly mediated by territorial and institutional inequalities.

Beyond spatial interpretation, the results suggest the existence of distinct territorial vulnerability profiles among São Paulo municipalities. In metropolitan and highly urbanized areas, vulnerability tends to be more closely associated with high population and infrastructure exposure to extreme events such as heatwaves, flooding, and intense precipitation. In interior municipalities, particularly those dependent on agriculture, vulnerability manifests more in relation to socioeconomic sensitivity and lower adaptive capacity to prolonged droughts and thermal fluctuations.

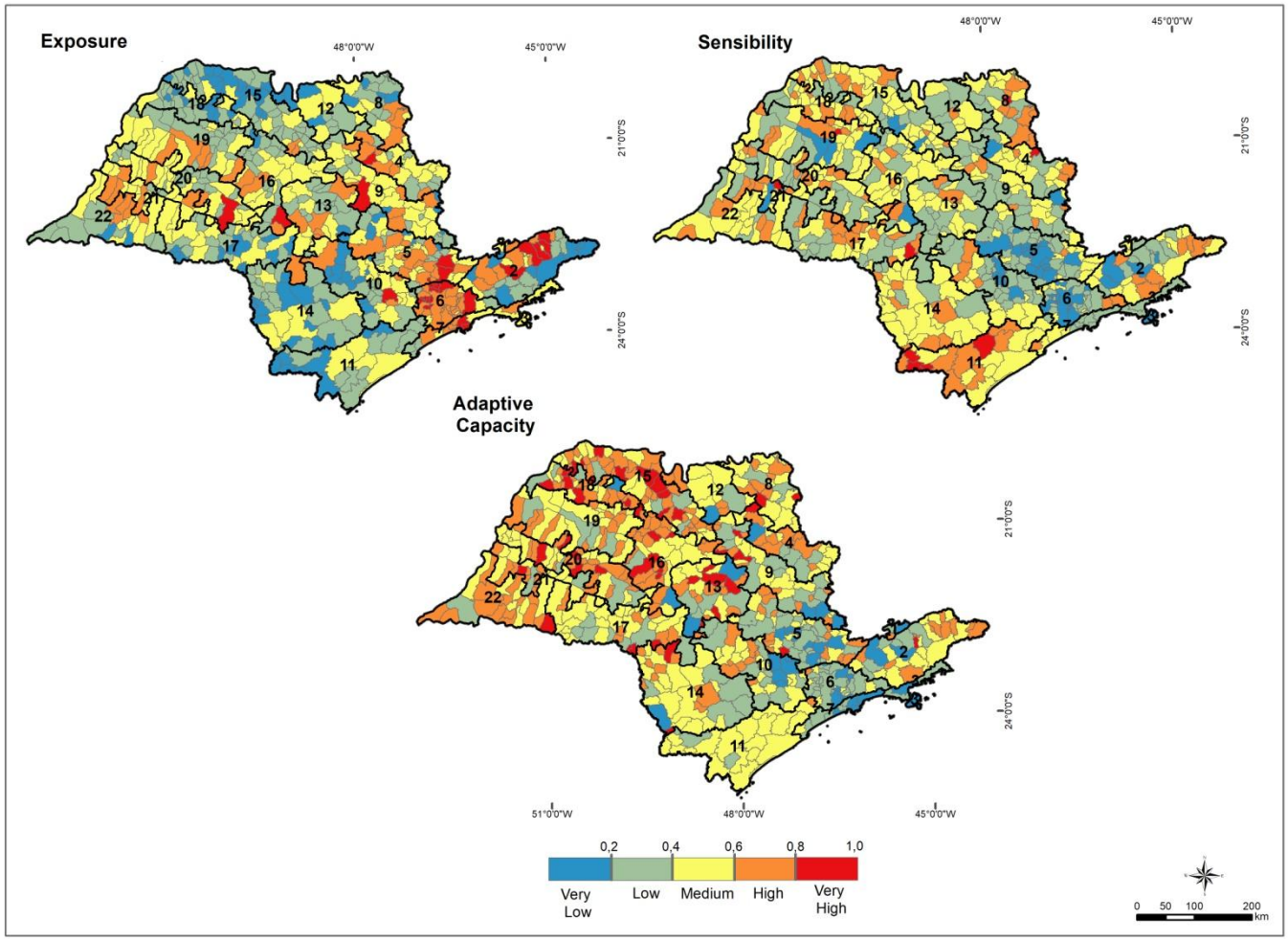


Figure 03 – Dimensions of the Climate Vulnerability Index (CVI) in São Paulo municipalities: Adaptive Capacity, Exposure, and Sensitivity. Warmer colors indicate "very high" classes. For Adaptive Capacity, very high values indicate greater adaptation capacity and resilience. For Exposure and Sensitivity, very high values correspond to greater climate risk and vulnerability.

Land use, vegetation cover, and vulnerability patterns also show a clear relationship. Municipalities with lower availability of urban green spaces and higher levels of anthropization generally exhibited less favorable CVI outcomes, particularly in sensitivity and adaptive capacity components. This highlights the importance of green infrastructure as a structural element of climate resilience.

Finally, the integrated subindex analysis confirms that climate vulnerability in São Paulo is closely linked to historically consolidated territorial inequalities. Municipalities with stronger socioeconomic indicators, higher management capacity, and better institutional coordination tend to exhibit better adaptive conditions, even under high exposure levels.

Methodologically, disaggregating the CVI into subindices proved particularly relevant, revealing that similar aggregate values may stem from very different territorial configurations. Municipalities classified in the same vulnerability range may therefore require differentiated intervention strategies depending on the relative predominance of exposure, sensitivity, or adaptive capacity.

From an applied perspective, this disaggregated view significantly enhances the index's utility in supporting decision-making. The results indicate that public policy prioritization should consider territorial specificities revealed by the subindices, directing investments more efficiently toward urban infrastructure, water management, institutional strengthening, and expansion of green infrastructure. In municipalities where socio-environmental sensitivity constitutes the main component of vulnerability, interventions targeting sanitation, public health, and social inequality reduction are likely to be particularly strategic. In areas with higher exposure, preventive and climate adaptation measures guided by territorial planning can produce more effective medium- and long-term outcomes.

Final Considerations

The primary contribution of this study lies in proposing a multiscale approach for assessing climate vulnerability at both municipal and regional levels. The results demonstrate that climate vulnerability in São Paulo State is spatially uneven, reflecting the interplay between environmental, socioeconomic, and institutional factors. The application of the Climate Vulnerability Index (CVI), structured around the IPCC's dimensions of exposure, sensitivity, and adaptive capacity, proved methodologically robust and enabled the identification of municipalities most susceptible to climate change impacts, while also providing insights into the local and regional factors shaping this vulnerability. Overall, higher vulnerability levels were concentrated in municipalities characterized by greater socio-environmental sensitivity, lower adaptive capacity, and institutional fragilities. Furthermore, the proposed methodological framework has the potential for replication in other federal units, provided it is adjusted to local territorial specificities.

The integrated analysis of the subindices revealed that municipal vulnerability does not follow a linear pattern, but rather results from diverse combinations of the index dimensions. In some cases, municipalities with high exposure exhibited relatively higher adaptive capacity, suggesting that historical experience with adverse climatic events may have strengthened institutional structures and consolidated risk management instruments. Conversely, municipalities with lower immediate exposure, yet marked by persistent structural weaknesses, were also found to be vulnerable, highlighting the importance of analytically territorial sensitive approaches.

Another significant aspect concerns the strong spatial dimension of the results. The distribution of vulnerability across Water Resources Management Units (WRMUs) and different regions of the state indicates that historical inequalities associated with urbanization, productive structure, water availability, and local governance directly shape observed vulnerability patterns. In this regard, the CVI demonstrates potential as a decision-support tool for regional planning and the identification of priority areas for climate adaptation, environmental management, and institutional strengthening.

From an applied perspective, the findings provide valuable evidence to support more territorially nuanced public policies, particularly in urban and environmental planning, water resources management, and climate adaptation. However, certain limitations should be acknowledged, particularly regarding the availability and temporal coverage of municipal-level secondary datasets, which reflect the conditions during the periods covered by the sources used, as well as the aggregated nature of some indicators, which may not fully capture more localized dynamics. Additionally, the adoption of equal weights for each index dimension, while chosen to preserve the analytical neutrality of the model, may not entirely reflect the differential importance of certain factors in specific territorial contexts. Future studies could explore alternative weighting methods, such as AHP, PCA, or expert-based techniques, to enhance the analytical robustness of the index.

For future research, more detailed intra-urban and regional-scale analyses are recommended, along with the incorporation of prospective climate change scenarios and dynamic indicators of governance and resilience. Subsequent studies could also examine differentiated weighting methodologies and empirical validation of the index using observed climate events. In this way, the present work contributes not only to diagnosing climate vulnerability in São Paulo State but also to advancing analytical tools that support adaptive planning and the reduction of territorial inequalities.

Acknowledgements

The authors acknowledge the support of FUSP (P4321 Project) and data providers that made this research possible.

Declaration of Generative Artificial Intelligence Use

During the preparation of this manuscript, the authors used the Generative Artificial Intelligence (GAI) tool ChatGPT (OpenAI) as support during the writing and text revision stages. All decisions related to the scientific content, including the conception, analysis, data interpretation, and conclusions, remain the sole responsibility of the authors, with GAI being used exclusively as writing support. Following the use of the tool, the authors thoroughly reviewed, edited, and validated all content, ensuring its compliance with scientific standards and assuming full responsibility for the final content of the publication. The use of the Generative Artificial Intelligence tool complies with the scientific integrity guidelines established by CNPq Resolution No. 2,664, dated March 6, 2026.

References

BARBI, F. **Governando as mudanças climáticas no nível local: riscos e respostas políticas**. 2014. Tese (Doutorado em Ambiente e Sociedade) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

BULKELEY, H.; BETSILL, M. M. Revisiting the urban politics of climate change. **Environmental Politics**, London, v. 22, n. 1, p. 136–154, 2013.

CHAKRABORTY, T; HSU, A; MANYA, D; LIAO, W; SHERIFF, G. A spatially explicit surface urban heat island database for the United States: Characterization, uncertainties, and possible applications. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,** v. 168, p. 74-88, 2020.DOI: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.07.021.

DAUNT, P. A. B.; SILVA, T. S. F.; BÜRGI, T.; HERSPERGER, A. M. Urban expansion and forest reserves: drivers of change and persistence on the coast of São Paulo State (Brazil). **Land Use Policy**, v. 101, 105189, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105189.

DI GIULIO, G. M. **As cidades brasileiras diante das mudanças climáticas**. GV Executivo, v. 23, n. 1, 2024.

GESUALDO, G. C.; OLIVEIRA, P. T.; RODRIGUES, D. B. B.; GUPTA, H. V. Assessing water security in the São Paulo metropolitan region under projected climate change. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, p. 4955–4973, 2019. DOI: https://doi.org/10.5194/hess-23-4955-2019.

HSU, A; SHERIFF, G; CHAKRABORTY, MANYA,D. Disproportionate exposure to urban heat island intensity across major US cities. **Nature Communications**, 12, 2721, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-021-22799-5.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados: São Paulo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br. . Acesso em: 2 abr. 2026.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Regiões metropolitanas, aglomerações urbanas e regiões integradas de desenvolvimento**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br. Acesso em: 2 abr. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the IPCC**. Geneva: IPCC, 2023.

LEMOS, M. F. (Coord)**. Cidades verdes-azuis resilientes**. 1. ed. Recife: Edições Saint Exupery, 2025. v. 1. 172 p. Disponível em: https://simaclim.com.br/relatorios-de-sintese/. Acesso em: 22 set. 2025.

LIMA, G. N.; LOMBARDO, M. A.; MAGAÑA, V. Urban water supply and the changes in the precipitation patterns in the metropolitan area of São Paulo – Brazil. **Applied Geography**, v. 94, p. 223–229, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.03.010.

MARENGO, J. A.; CAMARINHA, P.I; ALVEZ, L.M; DINIZ,F; BETTS, R.A; Extreme Rainfall and Hydro-Geo-Meteorological Disaster Risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C Global Warming Scenarios: An Analysis for Brazil. Frontiers in Climate. Vol 3, 2021. DOI: https://doi.org/10.3389/fclim.2021.610433.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

ONU. **Population challenges and development goals.** Disponível em: http://www.un.org/esa/population/publications/pop_challenges/Population_Challenges.pdf. . Acesso em: 5 out. 2015.

PANDEY, R.; JHA, S. K. Climate vulnerability index - measure of climate change vulnerability to communities: a case of rural lower Himalaya, India. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 17, n. 5, p. 487–506, 2011. DOI: https://doi.org/10.1007/s11027-011-9338-2.

QUINTÃO, A. F.; BRITO, I.a; OLIVEIRA, F.; MADUREIRA, A. P.; CONFALONIERI, U.. Social, Environmental, and Health Vulnerability to Climate Change: The Case of the Municipalities of Minas Gerais, Brazil. **Journal of Environmental and Public Health**, 2017, DOI: https://doi.org/10.1155/2017/2821343.

ROSENZWEIG, C; SOLECKI, W; ROMERO-LANKAO, P; MEHROTRA, S; DHAKAL, S; BOWMAN, T; IBRAHIM, S. A. **Climate change and cities: second assessment report of the Urban Climate Change Research Network**. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.

SILVA, A. L.; ALVES, D. S.; FERREIRA, M. P. Landsat-based land use change assessment in the Brazilian Atlantic Forest: forest transition and sugarcane expansion. **Remote Sensing**, Basel, v. 10, n. 7, p. 996, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/rs10070996.

SIMANE, B.; ZAITCHIK, B. F.; FOLTZ, J. D. Agroecosystem specific climate vulnerability analysis: application of the livelihood vulnerability index to a tropical highland region. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,** v. 21, n. 1, p. 39–65, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/s11027-014-9568-1.

TONMOY, F. N.; EL-ZEIN, A.; HINKEL, J. Assessment of vulnerability to climate change using indicators: a meta-analysis of the literature. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 13, n. 1, e746, 2014.

TORRES, P. H. C.; GONÇALVES, D. A.; COLLAÇO, F. M. A.; SANTOS, K. L.; KANAI, J; SOUSA JÚNIOR, W. C.; JACOBI, P. R. Vulnerability of the São Paulo Macro Metropolis to droughts and natural disasters: local to regional climate risk assessments and policy responses**. Sustainability**, v. 13, n. 1, p. 114, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/su13010114.

UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME (UN-HABITAT). **World cities report 2022: Envisaging the future of cities.** Nairobi: UN-Habitat, 2022.

VICEDO-CABRERA, A.M., SCOVRONICK, N., SERA, F. et al. The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. **Nature Climate Change**. 11, 492–500, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41558-021-01058-x.

YOUNG, A. F; NOBRE, C. A.Mapping Risk and Vulnerability in São Paulo Metropolitan Region. In: LEAL FILHO, Walter (Ed.). **Climate Change and Disaster Risk Management.** Berlin: Springer, 2012, p. 53–63. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-4223-9_6.

ZHAO, L; OPPENHEIMER, M; ZHU, Q; BALDWIN, J. W.; EBI, K. L. Interactions between urban heat islands and heat waves. **Environmental Research Letters**, Volume 13, Issue 3, 2018. DOI: https://doi.org/ 10.1088/1748-9326/aa9f73.

EFEITOS DAS ANOMALIAS DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR SOBRE O REGIME PLUVIOMÉTRICO DE JABOATÃO DOS GUARARAPES (PE)

1 Maria Helena Neves Ferreira, 2 Ioneide Alves de Souza
1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: helena.neves@ufrpe.br; 2 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: ioneide.alves@ufrpe.br.

Palavras-chave: Variabilidade climática; temperatura da superfície do mar; precipitação.

Resumo

A variabilidade climática no Nordeste Brasileiro (NEB) apresenta forte influência de fenômenos oceânico-atmosféricos que modulam o regime de precipitação regional. Este estudo analisa a variabilidade pluviométrica no município de Jaboatão dos Guararapes (PE) e sua relação com as anomalias de temperatura da superfície do mar associadas ao El Niño–Oscilação Sul (ENOS) e ao Dipolo do Atlântico. Para isso, foi utilizada uma série histórica de precipitação anual referente ao período de 1995 a 2024, obtida junto à Agência Pernambucana de Água e Clima (APAC). Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas para cálculo da média climatológica, do índice de variabilidade e da tendência temporal da precipitação. A tendência foi avaliada por meio de regressão linear simples, enquanto o teste não paramétrico de Mann-Kendall foi aplicado para verificar a significância estatística da tendência observada. Os resultados evidenciaram elevada variabilidade interanual da precipitação, com alternância entre anos secos e chuvosos ao longo da série histórica. Observou-se também tendência crescente nos totais anuais de precipitação, estimada em aproximadamente 30 mm por ano. Além disso, mais da metade dos anos analisados apresentou condições climáticas fora da normalidade. A análise das teleconexões indicou que a variabilidade pluviométrica regional resulta da interação entre o ENOS, o Dipolo do Atlântico e outros sistemas atmosféricos que atuam sobre o litoral do NEB.

Introdução

A variabilidade climática, compreendida como as flutuações no comportamento médio do clima e em suas propriedades estatísticas, como frequência, intensidade e distribuição temporal dos eventos meteorológicos, manifesta-se em múltiplas escalas espaciais e temporais. Para além dos eventos isolados, a concomitância com eventos extremos configura-se como uma questão de escala global, com impactos significativos sobre setores como economia, energia, agricultura, infraestrutura urbana e saúde pública (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). No contexto brasileiro, observa-se uma ainda limitada capacidade de adaptação frente a esses eventos, evidenciando fragilidades estruturais e institucionais. Nesse cenário, o NEB destaca-se como uma região de elevada vulnerabilidade socioambiental. Embora historicamente associado à ocorrência de secas, o litoral nordestino tem apresentado riscos crescentes relacionados a inundações e movimentos de massa, em função da concentração de elevados volumes de precipitação, sobretudo durante o inverno. De acordo com Aragão e Duarte (2023), o monitoramento de áreas suscetíveis a desastres torna-se essencial diante das mudanças observáveis no clima, especialmente em municípios densamente povoados, onde os impactos tendem a ser mais severos.

As teleconexões oceânicas exercem papel fundamental na modulação do regime pluviométrico do NEB, influenciando diretamente a ocorrência de eventos extremos na região, moldando a atuação de sistemas meteorológicos de mesoescala, possibilitando a intensificação ou desintensificação deles, e, assim, alterando significativamente a distribuição espacial e temporal das precipitações. O fenômeno ENOS, caracterizado por anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Oceano Pacífico, altera padrões de circulação atmosférica em escala global, estando frequentemente associado à redução das precipitações no NEB em sua fase quente segundo Araújo *et al*. (2013). Em paralelo, o Dipolo do Atlântico, definido pelo gradiente térmico entre o Atlântico Norte e Sul, desempenha papel decisivo no posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema responsável pelas chuvas na região (Servain, 1991). Em sua fase favorável, com o Atlântico Sul mais aquecido, observa-se o deslocamento da ZCIT para latitudes mais ao sul, o que pode intensificar os volumes de precipitação no litoral leste do Nordeste (Nobre; Shukla, 1996). Dessa forma, a interação entre esses forçantes oceânicos contribui para a variabilidade climática regional, podendo amplificar tanto eventos de estiagem quanto episódios de chuvas intensas, com impactos diretos sobre áreas urbanas vulneráveis.

No litoral pernambucano, a vulnerabilidade urbana intensifica os efeitos das oscilações climáticas, ampliando a exposição a desastres naturais. A ocupação desordenada de encostas e planícies fluviais torna municípios como Jaboatão dos Guararapes altamente suscetíveis a deslizamentos e alagamentos durante eventos de precipitação (Aragão; Duarte, 2023), os quais, por vezes, não necessitam apresentar elevada intensidade para provocar danos físicos e materiais significativos. Nesse contexto, observa-se que a atuação dos órgãos públicos tende a assumir um caráter predominantemente reativo, com foco na mitigação dos impactos já instalados, em detrimento de estratégias preventivas e de planejamento. Ademais, considerando que a interação entre o fenômeno ENOS e o Dipolo do Atlântico pode potencializar a ocorrência desses eventos, torna-se fundamental analisar a resposta climática local a esses forçantes oceânicos.

Apesar da importância regional desses fenômenos, há uma carência de estudos em escala municipal que correlacionem séries históricas específicas com índices oceânicos de longo prazo. Tal lacuna dificulta o planejamento urbano resiliente e a

mitigação de danos em escala local. Diante disso, o objetivo deste estudo é analisar como os fenômenos da temperatura superficial do oceano (ENOS e Dipolo do Atlântico) afetam o regime pluviométrico e a variabilidade climática de Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco, por meio de uma série histórica de 30 anos.

Área de Estudo

O município do Jaboatão dos Guararapes está localizado na Mesorregião Metropolitana do Recife, no estado de Pernambuco, Brasil. Com uma área territorial de aproximadamente 282,7 km², o município faz limite ao norte com o Recife e Camaragibe, ao sul com o Cabo de Santo Agostinho, a oeste com Moreno e a leste com o Oceano Atlântico, conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024). De acordo com o Demográfico de 2022, o município possui uma população residente de 644.037 habitantes, consolidando-se como o segundo maior colégio eleitoral e cidade mais populosa do estado (IBGE, 2024). Sua economia é robusta, baseada na prestação de serviços, comércio e um setor industrial estratégico, sendo considerado um dos principais nós logísticos de Pernambuco devido à sua malha rodoviária e proximidade com o Complexo Industrial Portuário de Suape (Agência de Desenvolvimento Econômico de Pernambuco, 2024).

A geomorfologia é marcada por planícies costeiras de origem sedimentar e uma zona de morros (tabuleiros) que compõem o ecossistema de "mares de morros". Essas características físicas, somadas à bacia hidrográfica do Rio Jaboatão, definem uma paisagem suscetível a processos erosivos e transbordamentos em períodos de alta pluviosidade (Aragão; Duarte, 2023). O clima local é classificado como Tropical Litorâneo Úmido (As'), conforme a classificação de Köppen *et al* (2006). O regime pluviométrico apresenta sazonalidade marcada, com o período chuvoso concentrado entre os meses de março e agosto, ademais a média climatológica anual ultrapassa os 2.000 mm, sendo fortemente influenciada pelos Ventos Alísios e Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) (Aragão; Duarte, 2023). A variabilidade interanual das chuvas está intimamente ligada às condições térmicas do Atlântico Tropical e do Pacífico Equatorial, que podem deslocar os sistemas atmosféricos ou alterar o aporte de umidade para o continente, apontam os autores Nobre e Shukla (1996) e Araújo *et al*. (2013).

Materiais e Métodos

Esse estudo analisa a variabilidade climática a partir de dados anuais de precipitação no município de Jaboatão dos Guararapes no período de 1995 a 2024. A coleta de dados se deu através da APAC, onde foi obtido o histórico de precipitação mensal da sequência avaliada do posto 202, para os anos de 1995 a 1997, e do posto 268, para os anos de 1998 a 2024. O estabelecimento do critério na seleção temporal decorreu da disponibilidade dos dados, totalizando em uma série de 30 anos, intervalo temporal definido pela World Meteorological Organization (WMO, 1989) como apropriado para estudos climáticos. Os dados foram sistematizados em planilhas eletrônicas, a partir das quais foram calculados os totais anuais, a média climatológica, o Índice de variabilidade, a tendência linear e aplicado teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975).

Ademais, para a mesma série histórica, foram coletadas informações referentes aos principais fenômenos oceânico-atmosféricos que alteram a TSM e influenciam o NEB, com o objetivo de analisar sua possível relação com a variabilidade pluviométrica observada, a saber: ENOS, referente à região do Niño 3.4, obtido por meio da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), através do Índice Oceânico Niño Relativo (RONI) que obtém a média móvel de três meses do índice Niño 3.4 relativo. E o Dipolo do Atlântico, foi obtido a partir da plataforma de monitoramento de teleconexões desenvolvida pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo índice Tropical Southern Atlantic (TSA), definido como a média das anomalias da temperatura da superfície do mar entre -20°S e 10°L-30°O.

ENOS		**Dipolo**	
La niña	T < -0,5	Favorável	TSA > 0,4
Neutro	-0,5 < T < 0,5	Neutro	-0,3 < TSA < 0,3
El niño	T > 0,5	Desfavorável	- 0,4 < TSA

Tabela 01: Classificação das anomalias da TSM. T = temperatura do Niño 3.4, TSA= índice TSA
Fonte: Autor (2026)

Foram analisados dados de anomalias da TSMs referentes ao período de janeiro a julho, em consonância com o principal período chuvoso da área de estudo, que se estende de abril a julho. Considerou-se uma defasagem temporal de três meses em relação ao início do período chuvoso, assumindo esse intervalo como representativo do tempo de resposta necessário para que as condições oceânicas influenciam a circulação atmosférica e, consequentemente, o regime pluviométrico regional (Souza, 2013).

Para a análise climatológica dos eventos extremos de chuva, aplicou-se o Índice de seca, conforme trabalhado por Moreno (1994) e adaptado por Souza (2013) para anos chuvosos. A classificação dos anos quanto à intensidade pluviométrica foi realizada a partir da seguinte equação:

$$I = \frac{X1 - \underline{X}}{\underline{X}}$$

Onde I é o Índice de Variabilidade, X_1 é a chuva total do ano e $\underline{X}$ é a média climatológica.

Os valores padronizados foram classificados em categorias qualitativas segundo intervalos pré-estabelecidos, permitindo a caracterização dos anos segundo os critérios:

Índice de variabilidade (*I*)	Classificação
$I < -0,6$	Seca Extrema
$0,6 \leq I < -0,4$	Seca Forte
$-0,4 \leq I < -0,2$	Seca Moderada
$-0,2 \leq I \leq 0,2$	Situação normal
$0,2 < I \leq 0,4$	Chuvoso
$0,4 < I \leq 0,6$	Muito chuvoso
$I > 0,6$	Extremamente chuvoso

Tabela 02: Classificação dos anos secos e chuvosos de acordo com o Índice de seca.
Fonte: Souza (2013)

A tendência temporal da precipitação anual acumulada foi avaliada por meio de regressão linear simples, considerando o tempo (ano) como variável independente (x) e a precipitação anual acumulada como variável dependente (y). O ajuste da reta foi realizado pelo método dos mínimos quadrados, conforme a Equação:

$$Y = ax + b$$

Em que Y representa a precipitação anual acumulada, x corresponde ao ano da série histórica, a é o coeficiente angular da reta (indicador da taxa de variação anual da precipitação) e b é o intercepto. O coeficiente angular foi utilizado para quantificar a magnitude da tendência ao longo do período analisado. O coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado para avaliar o grau de ajuste do modelo linear aos dados observados. Os cálculos foram realizados no software Excel, por meio da ferramenta de linha de tendência aplicada ao gráfico de dispersão.

Para avaliar a existência de tendência monotônica na série histórica, aplicou-se o teste não paramétrico de Mann-Kendall, utilizando a linguagem Python no Google Colab. A significância estatística foi avaliada ao nível de 5% ($p < 0,05$) e a magnitude da tendência foi estimada pelo método de Sen. Segundo Portela et al. (2011), esse teste é amplamente utilizado na detecção de tendências em séries temporais de variáveis hidrológicas, destacando-se por seu rigor estatístico e por não exigir pressupostos de normalidade dos dados. Os autores ressaltam que o método tem sido amplamente referenciado na literatura especializada, apresentando resultados consistentes e confiáveis na identificação de tendências monotônicas em séries ambientais.

Resultados e Discussão

A distribuição média mensal da precipitação, expressa na Figura 01, mostra-se consistente com a literatura, evidenciando maior concentração entre os meses de abril a agosto, período correspondente ao outono e inverno da região, destacando-se o mês de junho com média de 296 mm. A análise da variabilidade interanual da precipitação no município de Jaboatão dos Guararapes, no período de 1995 a 2024, evidenciou elevada oscilação nos totais anuais, com ocorrência alternada de anos secos e chuvosos ao longo da série (Figura 2). A média climatológica do período foi de 1675,5 mm, e serviu como referência para a identificação das anomalias anuais, revelando significativa variabilidade percentual em relação ao padrão médio.

Observa-se que os primeiros anos da série apresentaram maior frequência de totais abaixo da média climatológica, incluindo eventos classificados como seca forte e seca extrema, em contrapartida, nos anos mais recentes verifica-se aumento na ocorrência de anos chuvosos e extremamente chuvosos. Embora a maior parte dos anos tenha sido classificada como dentro da normalidade, os eventos extremos apresentaram grande impacto regional, destacando a relevância da análise da variabilidade climática para a compreensão dos riscos associados a eventos hidrometeorológicos intensos.

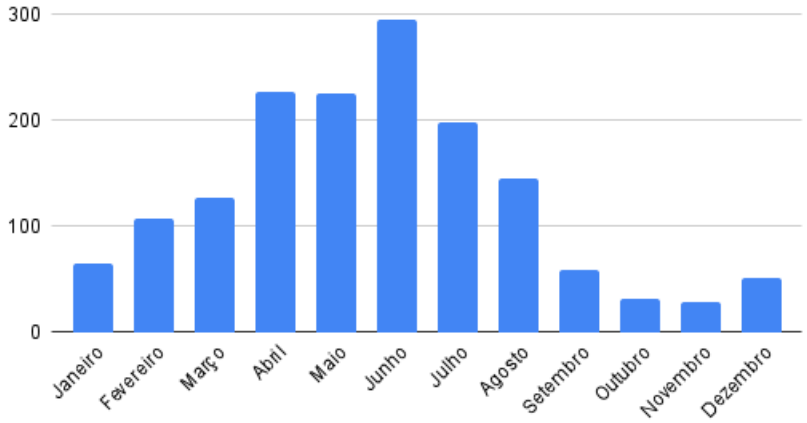


Figura 01: Precipitação média mensal do município de Jaboatão dos Guararapes - Pe
Fonte: Autor (2026)

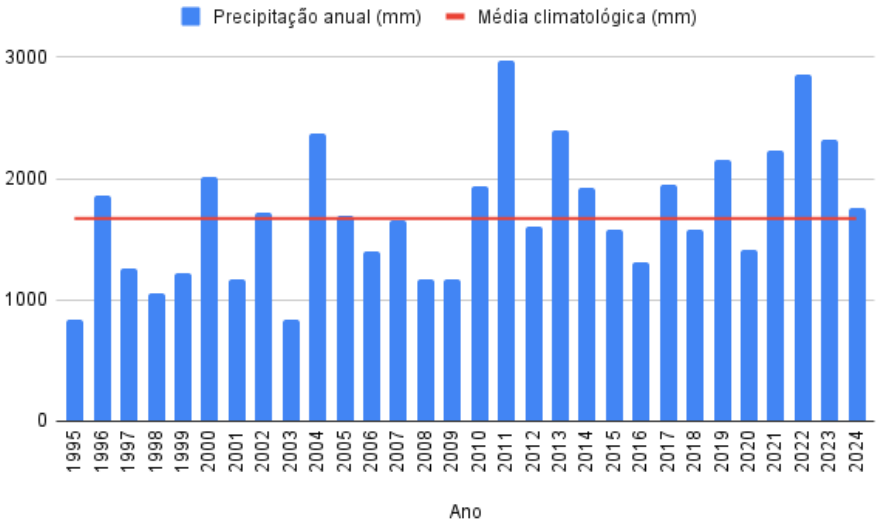


Figura 02: Variabilidade interanual da precipitação média do município de Jaboatão dos Guararapes - Pe
Fonte: Autor (2026)

A análise de dispersão (Figura 3) indicou tendência crescente da precipitação anual ao longo do período analisado. A regressão linear apresentou coeficiente angular aproximado de 30 mm por ano, sugerindo incremento médio anual nos totais pluviométricos. Apesar do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,238$) indicar que a variabilidade da precipitação não é explicada exclusivamente pela variável temporal, a inclinação positiva da reta evidencia um comportamento ascendente na série histórica. Outro aspecto relevante refere-se à tendência recente de maior ocorrência de anos chuvosos. Embora o histórico climático da série analisada apresenta significativa frequência de períodos secos, observa-se que, nas últimas décadas, episódios de precipitação acima da média têm assumido maior relevância estatística. Esse comportamento pode representar um desafio adicional para áreas urbanizadas, especialmente em municípios densamente povoados como Jaboatão dos Guararapes, onde a expansão urbana e a impermeabilização do solo aumentam a suscetibilidade a eventos de inundação e movimentos de massa.

O teste não paramétrico de Mann-Kendall confirmou a existência de tendência monotônica crescente estatisticamente significativa ($p = 0,006$), com estimativa de aumento médio de 29,8 mm por ano pelo método de Sen. A concordância entre o estimador de Sen e o coeficiente angular da regressão linear reforça a consistência dos resultados, indicando possível alteração no regime pluviométrico local nas últimas décadas.

A análise da variabilidade climática, representada na Figura 4, evidencia uma distribuição heterogênea das condições pluviométricas ao longo do período analisado. Observa-se a predominância da classe Situação Normal, responsável por 43,3% dos registros, indicando que, em parte significativa do período, o regime de precipitação manteve-se próximo aos padrões climatológicos esperados para a região. Contudo, a presença expressiva de anos classificados como extremos evidencia uma dinâmica climática marcada por elevada variabilidade interanual.

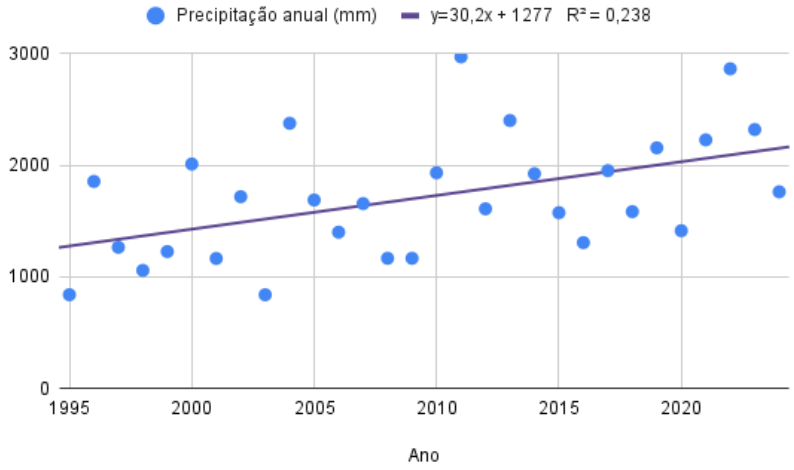


Figura 03: Distribuição e tendência de crescimento da precipitação anual no município de Jaboatão dos Guararapes - Pe
Fonte: Autor (2026)

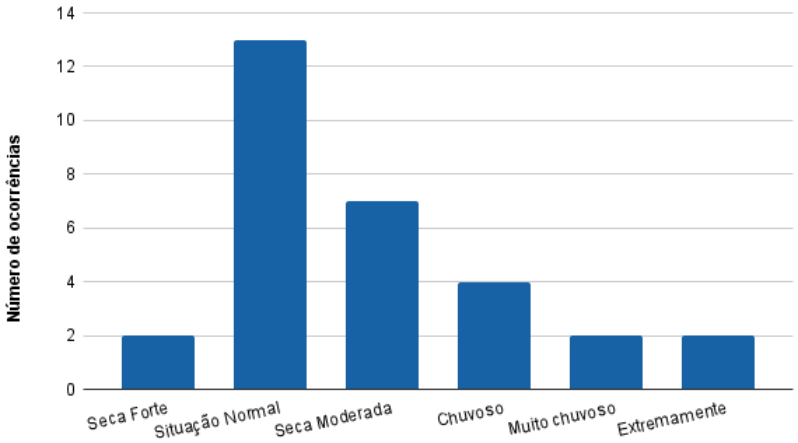


Figura 04: Classificação conforme Índice de Seca
Fonte: Autor (2026)

No que se refere aos eventos pluviométricos intensos, os anos classificados como Chuvoso, Muito Chuvoso e Extremamente Chuvoso correspondem conjuntamente a 26,7% do total analisado. Embora representem uma parcela menor do período, tais eventos possuem elevada relevância do ponto de vista socioambiental. Em muitos casos, esses episódios caracterizam-se pela ocorrência de elevados volumes de precipitação concentrados em intervalos relativamente curtos de tempo, o que potencializa impactos significativos sobre áreas urbanas e periurbanas. No município de Jaboatão dos Guararapes, eventos dessa natureza estão frequentemente associados a enchentes, alagamentos, deslizamentos de encostas e, em situações mais severas, à ocorrência de vítimas fatais. Enquanto cerca de 30% correspondem a eventos classificados entre seca moderada e seca forte. Além disso, quando considerados conjuntamente os extremos associados à escassez hídrica e à excessiva precipitação, observa-se que aproximadamente 56,7% dos anos analisados apresentaram condições climáticas fora da normalidade climatológica. Esse resultado evidencia que mais da metade do período analisado foi marcada por condições climáticas anômalas, indicando um contexto de elevada vulnerabilidade a eventos hidrometeorológicos.

A análise dos dados da Tabela 03 evidencia uma maior frequência de anos classificados como secos (9/30) em relação aos anos chuvosos (7/30). Embora essa diferença seja relativamente pequena, observa-se que os eventos classificados como chuvosos passam a ocorrer com maior recorrência a partir da segunda metade da série, sugerindo uma mudança no comportamento pluviométrico ao longo da série temporal analisada. Os anos secos foram identificados em praticamente todas as combinações entre ENOS e Dipolo do Atlântico, inclusive sob Dipolo favorável, condição que, em princípio, poderia estar associada a maiores volumes de precipitação. Esse resultado reforça que a resposta climática regional não depende exclusivamente de um único forçante, evidenciando a atuação conjunta de múltiplos mecanismos atmosférico-oceânicos e a natureza não linear da variabilidade climática.

Eventos climáticos	El niño	La niña	ENOS neutro
Dipolo favorável	1998, 2016, 2019, 2024	1999, 2008, 2011, 2021, 2022	1995, 1996, 2003, 2009, 2010, 2017, 2020, 2023
Dipolo desfavorável	1997	-	-
Dipolo neutro	2015	2000, 2001, 2012, 2018	2002, 2004, 2005, 2006, 2007, 2013, 2014

Tabela 03: Classificação dos anos secos e chuvosos de acordo com o Índice de seca. Chuvoso ($I > 0,4$) = azul, Normal = Preto e Seco ($I < -0,2$) = Vermelho.
Fonte: Autor(2026)

A distribuição dos dados também indica que o Dipolo do Atlântico apresenta predominância das fases favorável e neutra, enquanto a fase desfavorável registrou apenas uma ocorrência ao longo do período analisado. O Dipolo favorável apresentou eventos de elevado volume pluviométrico em todas as combinações com as fases do ENOS, com destaque para sua associação com a La Niña, que concentrou o maior número de casos chuvosos, em consonância com o comportamento climatológico esperado para essa configuração. Por outro lado, o Dipolo neutro demonstrou menor relevância na modulação dos extremos pluviométricos, uma vez que esteve associado majoritariamente a anos classificados como normais. Enquanto o ENOS neutro apresentou quatro eventos extremos, dos quais três corresponderam a episódios de seca, indicando uma tendência de maior associação com déficits pluviométricos dentro da série analisada.

De forma geral, os resultados sugerem intensificação recente dos totais anuais de precipitação, associada à elevada variabilidade interanual e à influência combinada de forçantes oceânicas. Esse comportamento pode estar relacionado às mudanças observadas no padrão climático regional, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo e aprofundamento das análises sobre extremos hidrometeorológicos no NEB.

Considerações Finais

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que o município de Jaboatão dos Guararapes apresenta um regime pluviométrico marcado por elevada variabilidade interanual, com alternância significativa entre anos secos, habituais e chuvosos ao longo da série histórica de 1995 a 2024. A análise dos totais anuais demonstrou que mais da metade do período investigado apresentou condições fora da normalidade climatológica, o que reforça a expressiva instabilidade do comportamento pluviométrico local. Esse padrão confirma que a dinâmica das chuvas na área de estudo não se restringe a oscilações sazonais esperadas, mas reflete a atuação de múltiplos mecanismos climáticos em diferentes escalas temporais e espaciais, influenciando diretamente a ocorrência de eventos hidrometeorológicos extremos.

A tendência crescente da precipitação anual, estimada em aproximadamente 30 mm por ano e confirmada pelo teste estatístico de Mann-Kendall, representa um dos principais achados da pesquisa. A convergência entre a regressão linear e o estimador de Sen confere maior robustez metodológica aos resultados e sugere possíveis alterações recentes no regime climático do litoral pernambucano. Tal comportamento assume elevada relevância científica, uma vez que pode estar associado tanto à variabilidade climática natural quanto a mudanças mais amplas nos padrões atmosféricos e oceânicos que influenciam o NEB. Sob a perspectiva aplicada, esse aumento progressivo dos totais anuais de precipitação impõe desafios significativos ao planejamento urbano, especialmente em municípios densamente povoados e com histórico recorrente de alagamentos, inundações e movimentos de massa.

No que se refere aos mecanismos de controle climático, a pesquisa demonstrou que a variabilidade pluviométrica de Jaboatão dos Guararapes resulta da interação entre fenômenos oceânico-atmosféricos de grande escala, com destaque para o ENOS e o Dipolo do Atlântico. Entretanto, os resultados também evidenciaram que a resposta pluviométrica local não ocorre de forma linear ou exclusivamente condicionada por essas teleconexões. A ocorrência de anos secos sob influência de La Niña e de anos chuvosos durante episódios de El Niño indica que outros sistemas atmosféricos regionais, como os Distúrbios Ondulatórios de Leste e processos convectivos de mesoescala, desempenham papel complementar na modulação das chuvas.

Do ponto de vista socioambiental, os achados possuem implicações diretas para a gestão territorial e a redução de riscos de desastres. Considerando as características geomorfológicas do município, marcadas pela presença de planícies costeiras e áreas de morro intensamente urbanizadas, a maior frequência de anos chuvosos e extremos pode intensificar processos de erosão, instabilidade de encostas, inundações urbanas e impactos sobre a infraestrutura. Nesse contexto, os resultados reforçam a necessidade de fortalecimento de políticas públicas preventivas, incluindo planejamento urbano orientado por mapas de suscetibilidade e estratégias de adaptação climática em escala municipal. A incorporação dessas informações em instrumentos de gestão pode contribuir significativamente para a mitigação de danos humanos, sociais e econômicos.

Referências

ARAGÃO, Maria Letícia; DUARTE, Cristina Coutinho. Dinâmica climática, eventos extremos e impactos associados no município do Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 16, n. 2, p. 818-836, 2023.

ARAÚJO *et al*. A influência do evento El Niño - Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre regiões norte e nordeste da América do Sul. **Acta Amazonica**, Amazônia, v. 43, n. 4, p. 469-480, 2013.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo Demográfico 2022**: resultados do universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Cidades e Estados**: Jaboatão dos Guararapes. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021**: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

KENDALL, M. G. **Rank correlation Methods**. Londres: Charles Griffin, 1975.

KÖPPEN *et al*. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006.

MANN, H. B. Non-parametric tests against trend. **Econometria**, v.13, p.245-259, 1945

MORENO, H. G. Estadisticas de Ia sequia en Colombia. **Atmosfera**, Bogotá, n. 22, p. 67-70, 1994.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Relative Oceanic Niño Index (RONI)**. College Park, MD: Climate Prediction Center/NCEP, 2026. Disponível em: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso/roni/. Acesso em: jan. 2026.

NOBRE, Paulo; SHUKLA, Jagadish. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the Tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, Boston, v. 9, n. 10, p. 2464-2479, 1996.

PERNAMBUCO. Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). **Monitoramento Pluviométrico**. Recife: APAC, 2026. Disponível em: http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php. Acesso em: jan. 2026.

PERNAMBUCO. Agência de Desenvolvimento Econômico de Pernambuco (ADEPE). **Perfil Econômico dos Municípios**: Jaboatão dos Guararapes. Recife: ADEPE, 2024.

PORTELA *et al*. Tendências em séries temporais de variáveis hidrológicas. **Recursos Hídricos**, Lisboa, v. 32, n. 1, p. 43–60, 2011.

SERVAIN, Jacques. Simple climate indices for the Tropical Atlantic Ocean and some applications. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, n. C8, p. 15,137-15,146, Washington, 1991.

SOUZA, Ioneide Alves de. **Variabilidade climática e deficiência hídrica na Bacia do Una, PE e sua relação com as anomalias de temperaturas dos oceanos Pacífico e Atlântico**. 2013. 105 f. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ (UNIFEI). **Índice TSA (Tropical Southern Atlantic)**. Itajubá: Instituto de Recursos Naturais, 2026. Disponível em: https://meteorologia.unifei.edu.br/teleconexoes/indice?id=tsa. Acesso em: jan. 2026.

WORLD METERIOLOGICAL ORGANIZATION. Calculation of monthly and annual 30-years standard normals. Geneva: WMO, 1989. (WCDP- No. 10, WMO-TD/No. 341).

MACHINE LEARNING NA PREVISÃO DE NÍVEIS HÍDRICOS URBANOS: O CASO DO RIO ACARI, RIO DE JANEIRO

1 Gustavo Antunes Vieira Alves, 2 Lúcio Silva de Souza
1 UERJ, e-mail: gustavo-260799@hotmail.com; 2 UERJ, e-mail: luciodesouza@gmail.com

Palavras-chave: Previsão de Inundações; Hidrologia Urbana; Machine Learning

Resumo

A intensificação de eventos hidrometeorológicos extremos e a urbanização acelerada elevam a vulnerabilidade a inundações no município do Rio de Janeiro, especialmente em bacias de resposta rápida. Nesse cenário, sistemas de previsão precisos são fundamentais para a gestão de riscos em áreas densamente povoadas. Este trabalho avalia a aplicação do algoritmo XGBoost na predição da altura de lâmina d'água no rio Acari (RJ) em horizontes de 30 a 300 minutos, visando antecipar cenários críticos de transbordamento. Foram utilizados dados fluviométricos e pluviométricos abrangendo o período de 2010 a 2016 e padronizados para resolução temporal de 5 minutos.

A modelagem foi estruturada a partir da previsão da variação do nível (Δnível), posteriormente convertida em nível absoluto, adicionalmente, foram incorporadas variáveis derivadas, como defasagens temporais, acumulados de precipitação e atributos cíclicos, permitindo representar a memória hidrológica e padrões sazonais do sistema. A calibração dos modelos foi realizada por meio de otimização automática de hiperparâmetros com a biblioteca Optuna.

Os resultados indicaram elevado desempenho nos horizontes de curtíssimo prazo, com R^2 de 0,986 e NSE de 0,985 para o horizonte de 30 minutos, mantendo desempenho satisfatório até aproximadamente 120 minutos. Para horizontes superiores, observou-se degradação progressiva das métricas, especialmente na representação de eventos extremos, com tendência à subestimação de picos.

Conclui-se que o XGBoost apresenta elevado potencial para aplicações em previsão hidrológica de curto prazo em bacias urbanas, constituindo uma ferramenta promissora para sistemas de alerta precoce, desde que suas limitações em horizontes mais longos sejam consideradas no contexto operacional.

Introdução

A intensificação de eventos hidrometeorológicos extremos nas últimas décadas tem produzido efeitos cada vez mais perceptíveis nos centros urbanos brasileiros (MMA, 2016). Entre 2013 e 2023, aproximadamente 93% dos municípios do país registraram ocorrências de desastres associados a tempestades e inundações (Mesquita, 2024). Esse quadro não pode ser dissociado do processo de urbanização acelerada e da ocupação recorrente de áreas suscetíveis a inundações, fatores que, conforme apontado por Tucci (2008), podem elevar a vazão de cheia em até sete vezes aos observados em bacias sob condições naturais.

No município do Rio de Janeiro, onde residem mais de 6,2 milhões de habitantes, esses fatores se manifestam de forma aguda (IBGE, 2022). A recorrência de alagamentos e transbordamentos impacta diretamente a mobilidade urbana, compromete serviços essenciais, além de gerar prejuízos materiais e sociais expressivos. Em situações de chuva intensa, os efeitos são rapidamente percebidos pela população e demandam respostas cada vez mais eficientes do poder público.

A gestão integrada dos recursos hídricos, particularmente em áreas densamente ocupadas demanda, portanto, mecanismos consistentes de monitoramento e previsão que permitam antecipar cenários críticos com grau aceitável de precisão. Dentro dessa perspectiva, técnicas baseadas em Machine Learning (ML) têm sido reconhecidas como abordagens complementares capazes de explorar relações não lineares complexas entre variáveis hidrometeorológicas, sendo capaz de reproduzir essa complexa não linearidade de eventos de inundação sem a necessidade de parametrizações físicas exaustivas.

O nível hídrico exibe padrões que dependem fortemente da geomorfologia e dos padrões de uso e ocupação do solo (Souza; Silva, 2025), tornando modelos como as Redes Neurais Artificiais (RNA) e o Extreme Gradient Boosting (XGBoost) ferramentas eficazes para representar a captura desses comportamentos (Marcos Junior et al., 2023; Gao et al., 2024; Mesquita, 2024). Recentemente, na revisão de literatura conduzida por Niazkar et al. (2024), o XGBoost demonstrou superioridade em 74% das aplicações hidrológicas, destacando-se por sua eficiência computacional e precisão.

Diante disso, o presente estudo propõe aplicar o modelo de ML XGBoost para estimar o nível futuro em horizontes de curto prazo (de 30 a 300 minutos) do rio Acari, situado no município do Rio de Janeiro, em múltiplos horizontes temporais, buscando avaliar sua capacidade de antecipação de eventos críticos em cenário de limitação observacional e sua aplicabilidade como ferramenta de apoio à gestão pública, de modo que os resultados possam subsidiar ações operacionais dos órgãos competentes.

Material e Métodos

O bairro de Acari localiza-se na Zona Norte do município do Rio de Janeiro, integrando a Área de Planejamento 3 (AP3), região caracterizada historicamente pela ocupação de subúrbios com intensa urbanização e baixo grau de verticalização (RIO DE JANEIRO, 2015). A bacia hidrográfica do Rio Acari (Figura 1), que abrange uma área de aproximadamente 107 km², representando cerca de 8% da extensão municipal, e abriga quase um milhão de habitantes, 20% da população total do município, além de apresentar elevada vulnerabilidade socioambiental, fruto de um processo de expansão urbana acelerado sobre áreas de várzea e margens de rios (Xavier, 2022).

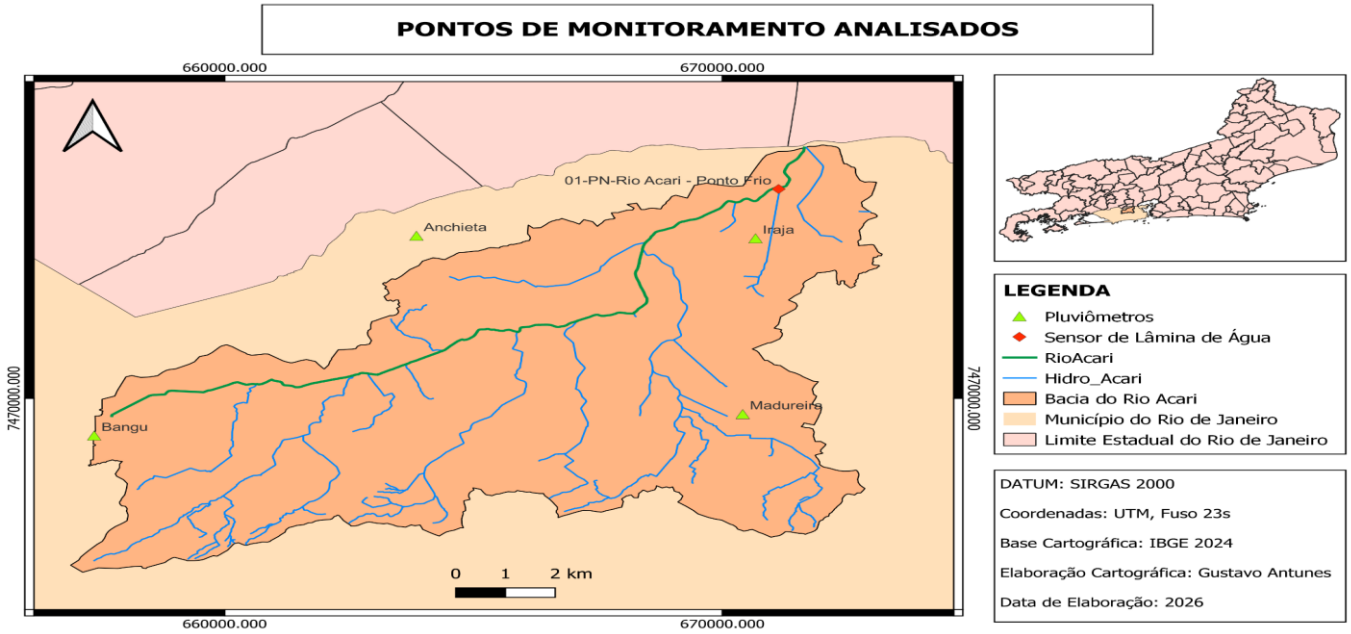


Figura 01: Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Acari e Pontos de Monitoramento - Rio de Janeiro. Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Conforme apontado por Xavier (2022), o Rio Acari possui um formato alongado, com um Índice de Circularidade de 0,007, o que teoricamente favorece a distribuição do escoamento, mas resulta em cheias de longa duração quando a vazão atinge picos elevados. Além disso, a topografia de baixa declividade (< 5%) no trecho urbano, somada à elevada impermeabilização do solo, torna o escoamento lento e a região altamente suscetível a alagamentos por deficiência de drenagem.

Historicamente, o bairro registra ocorrências frequentes de enchentes e inundações, especialmente durante o período chuvoso, ocasionando impactos diretos à população local. Pesquisas recentes e levantamentos de campo indicam que a maioria dos moradores de Acari enfrenta enchentes frequentes, onde cerca de 91,2 % dos residentes relatam alagamentos regulares nas ruas em que vivem, e aproximadamente 64,1 % tiveram seus domicílios invadidos por água em episódios recentes de chuva (Instituto Decodifica, 2025)

Ao longo de seu percurso urbano de 20 km, o rio Acari sofre forte influência antrópica. O assoreamento é um dos problemas mais críticos, agravado pelo descarte inadequado de resíduos sólidos e efluentes domésticos diretamente no corpo hídrico, criando barreiras que atuam como represas, provocando elevações abruptas do nível d'água e transbordamentos frequentes para áreas que, naturalmente, não seriam inundadas (Xavier, 2022).

O Extreme Gradient Boosting (XGBoost) é um algoritmo de aprendizado de máquina supervisionado baseado em árvores de decisão, cujo desempenho tem sido amplamente reconhecido em tarefas de regressão e classificação, especialmente em contextos que demandam elevada capacidade de generalização e eficiência computacional (Souza; Silva, 2025; Nabilah; Hakim, 2025; Marcos Junior et al., 2023). Esse modelo representa uma evolução das técnicas de Gradient Boosting (GB), integrando múltiplos modelos de aprendizado fraco de forma sequencial para gerar um modelo mais robusto (Niazkar et al., 2024) e destaca-se ainda sua capacidade nativa de lidar com dados incompletos, aprendendo o melhor caminho para valores ausentes sem a necessidade de imputação artificial (Chen; Guestrin, 2016).

Na área de recursos hídricos, o modelo tem sido amplamente adotado devido à sua eficiência computacional e capacidade de processar grandes volumes de dados, além da capacidade de capturar relações não lineares e complexas observadas nos sistemas ambientais. Uma revisão sistemática recente revelou que o XGBoost (ou modelos híbridos baseados nele) apresentou os melhores resultados em 74% dos estudos hidrológicos e hidráulicos analisados, evidenciando desempenho consistente em diferentes contextos de aplicação (Niazkar et al., 2024).

No Brasil, o XGBoost tem sido adotado de forma crescente na modelagem hidrológica para lidar com a complexidade e a não-linearidade de bacias nacionais. O algoritmo tem sido utilizado na bacia do Rio Almada, no sul da Bahia, para a predição de níveis de inundação em diferentes horizontes temporais, demonstrando excelente desempenho em previsões de curto prazo conforme demonstrado por Souza e Silva (2025). Já em bacias de grande importância energética, como a de Sobradinho, o XGBoost foi integrado ao modelo hidrológico tradicional SMAP para criar uma estrutura híbrida capaz de prever vazões com maior precisão, corrigindo resíduos e reduzindo a subestimação sistemática de valores observados. Já na predição de vazões afluentes no reservatório de Três Marias, em Minas Gerais, os resultados obtidos indicaram desempenho superior ao modelo estatístico PAR, evidenciando o potencial da técnica para aplicações associadas à otimização da operação do Sistema Interligado Nacional (Marcos Junior et al., 2023, 2024).

Os dados de altura de lâmina d`água utilizados neste estudo foram obtidos a partir do sistema Monitor-Águas, anteriormente operado pela Fundação Rio-Águas, que utilizava estações telemétricas automatizadas para o registro contínuo de

Nível (PN) (RIO DE JANEIRO, 2015). Para a análise foram utilizados dados abrangendo o período de 2010 a 2017, associados ao ponto de monitoramento do rio Acari.

Durante o período analisado, observou-se alteração na frequência de aquisição dos dados. Inicialmente, os registros eram realizados em intervalos de 10 minutos, contudo, a partir de junho de 2011, a Fundação Rio-Águas passou a adotar resolução temporal de 5 minutos, padrão que permaneceu até o encerramento da série em 2017.

A análise exploratória evidenciou elevada consistência e continuidade da série entre 2010 e 2016, registrando apenas uma falha de aproximadamente 1 mês, de 09 de janeiro de 2014 a 10 de fevereiro de 2014. No entanto, a partir de 2017, observou-se uma alteração significativa no comportamento dos dados, caracterizada por inconsistências nos registros. Tal padrão está em consonância com a desativação do sistema Monitor-Águas e a perda de continuidade operacional da rede, conforme relatado por Magalhães (2019). Em função da baixa confiabilidade apresentada (Tabela 01 e Figura 02), o ano de 2017 foi excluído das análises subsequentes, sendo adotado como período válido o intervalo de 2010 a 2016.

Ano	Média	Mediana	Máximo	Desvio Padrão
2010	0.51	0.46	3.60	0.30
2011	0.50	0.44	3.70	0.31
2012	0.73	0.64	2.73	0.39
2013	1.13	1.15	4.97	0.33
2014	0.45	0.40	2.72	0.31
2015	0.71	0.66	4.05	0.33
2016	0.81	0.76	4.57	0.38
2017	**10.08**	**10.15**	**20.27**	**2.10**

Tabela 01: Análise exploratória dos dados de altura de lâmina d'água Rio-Águas.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

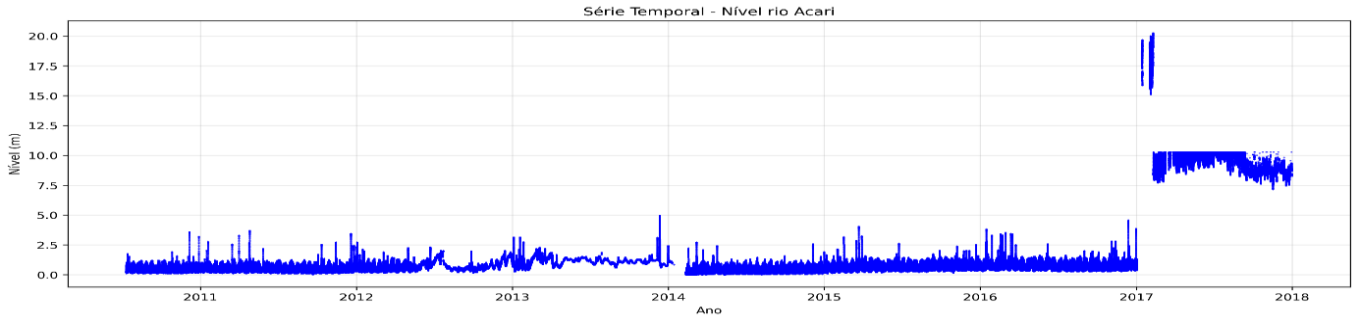


Figura 02: Gráfico de completude dos dados de nível, rio Acari – Ponto Frio.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para a pluviometria, foram utilizados dados provenientes da rede Alerta Rio, sistema operacional da Prefeitura do Rio de Janeiro voltado ao monitoramento hidrometeorológico urbano (ALERTA-RIO, 2026). Foram selecionados os pluviômetros localizados dentro recorte espacial da bacia hidrográfica do rio Acari, sendo eles: Bangu, Irajá e Madureira. Adicionalmente foi incluído o pluviômetro de Anchieta que, apesar de se situar fora da delimitação da bacia do Acari, está inserido na sub-bacia dos rios Acari/Pavuna/Meriti e possui forte conectividade hidrológica com a área de estudo (RIO DE JANEIRO, 2020). As chuvas registradas nessa estação contribuem para o volume do rio Pavuna, que atua como foz do rio Acari, a inserção desses dados possibilita que o modelo capture a dinâmica de remanso que o rio Pavuna causa no nível do rio Acari.

Os dados de precipitação abrangeram o período de 2010 a 2016, com resolução temporal de 15 minutos. Foi realizada análise de completude e a inspeção visual do gráfico de completude (Figura 03) indicou boa consistência temporal das séries selecionadas, com completude acima de 95% em todo período e ausência de lacunas prolongadas que comprometessem sua utilização na modelagem preditiva.

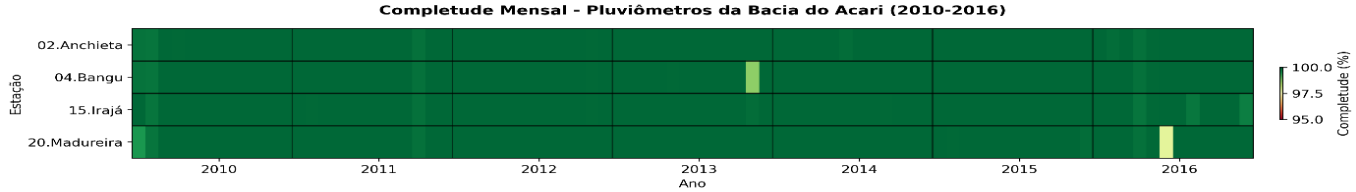


Figura 04: Gráfico de completude mensal dos pluviômetros utilizados.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O processamento das séries temporais de nível hidrométrico e precipitação foi realizado em ambiente Python, com utilização predominante das bibliotecas pandas e NumPy. O recorte temporal adotado, de 11 de julho de 2010 a 31 de dezembro

de 2016, foi definido após avaliação exploratória de consistência e continuidade das séries, fatores fundamentais para a confiabilidade de modelos de Aprendizado de Máquina (Pugas, 2024).

Devido à heterogeneidade das fontes os dados brutos apresentaram resoluções temporais distintas sendo 15 minutos para as estações de precipitação do Alerta Rio e variação de 10 e 5 minutos para as estações de altura de lâmina d'água da Rio-Águas, sendo esta última a frequência adotada oficialmente a partir de junho de 2011. Para uniformizar a resolução temporal, foi adotada a resolução temporal de 5 minutos para todo o período analisado.

Essa uniformização das séries temporais para o intervalo de 5 minutos é fundamentada pela necessidade de representar a magnitude e o tempo de resposta dos eventos extremos, uma vez que escalas de alta resolução são fundamentais para capturar a dinâmica de sistemas sujeitos a cheias rápidas, como ocorre no rio Acari (Santos et al., 2023; Xavier, 2022). Somado a isso, em bacias menores que 500km² são demandados dados com alta resolução espacial e temporal para que os cenários de inundação sejam reconstruídos com precisão (Santos et al., 2023), essa suavização e dificuldade de capturar com detalhes o comportamento da inundação devido ao uso de resoluções menores foi pontuada por Magro (2021).

Por fim, a adoção dessa frequência promove a adequação aos padrões institucionais vigentes no município do Rio de Janeiro, alinhando à série histórica da Rio-Águas, que operou em 5 minutos a partir de junho de 2011, e à atualização mais recente do sistema Alerta Rio, que migrou para esta mesma frequência em novembro de 2024 (ALERTA-RIO, 2026). Nos trechos em que os dados de nível apresentavam intervalo original de 10 minutos, aplicou-se interpolação linear restrita, buscando preservar a dinâmica hidrodinâmica da série. As séries pluviométricas, originalmente registradas a cada 15 minutos, foram reamostradas para 5 minutos mediante redistribuição proporcional do volume acumulado, combinada com preenchimento progressivo.

Foram geradas então defasagens do nível (lags) e acumulados móveis para cada estação em janelas temporais de 1 a 24 horas, permitindo identificar padrões de memória hidrológica e tendências locais. Também foram calculadas as variações do nível em relação a 1 e 3 horas anteriores, visando representar tendências recentes de elevação ou recessão. Variáveis temporais de hora e mês foram transformadas por funções trigonométricas para representar sua natureza cíclica, possibilitando o reconhecimento de padrões diários e sazonais. A adoção dessas estratégias é amplamente reportada na literatura aplicada à modelagem hidrológica com aprendizado de máquina, conforme observado em Rodrigues e Martins (2025), Filho et al. (2025) e Magro (2021).

Optou-se por manter as lacunas dos dados nas séries, considerando que o XGBoost possui um mecanismo interno que aprende automaticamente o melhor caminho de divisão nas árvores para observações com valores ausentes, incorporando essa informação na própria estrutura do modelo (Chemura apud Niazkar et al., 2024). Essa decisão evita a introdução de ruído artificial e preserva as características originais da série temporal (Pugas, 2024), além de estar alinhada com o objetivo de avaliar a capacidade de antecipação de eventos críticos em cenário de limitação observacional. Foram removidos apenas registros inconsistentes, duplicados ou com ausência na variável alvo.

Neste estudo, a modelagem foi conduzida a partir da previsão da variação do nível hidrométrico (Δnível) em relação ao instante atual. O valor estimado dessa variação é posteriormente somado ao nível observado no instante de referência, permitindo a reconstrução do nível absoluto do rio.

A adoção dessa abordagem parte do entendimento de que o nível hídrico apresenta comportamento fortemente não linear, condicionado às características hidrodinâmicas específicas da bacia. Ao concentrar o treinamento na variação temporal, busca-se reduzir a influência de componentes estruturais persistentes da série e enfatizar a dinâmica de curto prazo, típica de sistemas urbanos sujeitos a eventos intensos de precipitação (Souza; Silva, 2025).Conforme apontado por Iqbal et al. (2021), a modelagem baseada em incrementos ou diferenças temporais é eficaz para minimizar dependências temporais fortes, estabilizando a média da série e reduzindo o impacto de tendências e sazonalidades que podem enviesar o modelo. Embora o treinamento do modelo tenha sido conduzido no domínio da variação do nível, todas as métricas de desempenho e análises comparativas foram calculadas a partir dos níveis absolutos reconstruídos.

A divisão do conjunto de dados em treinamento e teste seguiu critério cronológico estrito e o conjunto de dados foi dividido na proporção de 80% para treinamento e 20% para teste, um padrão amplamente adotado em estudos hidrológicos (Niazkar et al., 2024; Rodrigues; Martins, 2025; Nabilah; Hakim, 2025).

A parametrização do modelo é uma etapa decisiva, pois o desempenho do XGBoost em recursos hídricos é altamente dependente do ajuste fino de sua estrutura para capturar as relações não lineares complexas (Nabilah; Hakim, 2025). Para este estudo, a definição dos hiperparâmetros foi realizada por meio de otimização automática com a biblioteca Optuna, baseada em amostragem bayesiana.

A função de otimização priorizou a minimização da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), priorizando o desempenho nos extremos (Marcos Junior et al., 2023). Essa escolha é fundamentada pela natureza altamente não linear das respostas hídricas em bacias urbanas, nas quais variações abruptas de nível concentram maior risco operacional (Souza; Silva, 2025), já observados anteriormente no rio Acari (Xavier, 2022).

Por fim o desempenho dos modelos foi avaliado por meio de métricas estatísticas complementares, amplamente utilizadas em estudos hidrológicos (Souza; Silva, 2025), incluindo o Erro Médio Absoluto (MAE), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Coeficiente de Determinação (R^2) e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) amplamente utilizado em estudos similares. Adicionalmente, foi feita uma análise de desempenho do modelo em eventos extremos (P90) que, conforme o IPCC (2021), é particularmente relevante em bacias urbanas onde os maiores impactos socioambientais são observados justamente nas condições de cheia.

Resultados e Discussão

A Tabela 02 apresenta a síntese das métricas de desempenho do XGBoost para horizontes de previsão entre 0,5 e 5 horas. Observa-se desempenho elevado nos horizontes de curtíssimo prazo, com R^2 igual a 0,986 e NSE de 0,985 para 30 minutos de antecedência. Esses valores corroboram com a literatura e evidenciam a elevada capacidade do modelo em reproduzir a variabilidade observada da série, inclusive nos trechos de maior magnitude, considerando que o NSE atribui maior penalização a desvios associados a picos hidrológicos (Gao et al., 2024).

Nesse mesmo horizonte, o MAE foi de 2,59 cm e o RMSE de 4,43 cm, evidenciando baixa dispersão residual. Em escalas temporais reduzidas, portanto, o modelo mantém forte aderência entre valores observados e estimados, compatível com a predominância da persistência hidrológica no comportamento do nível.

Até 1,5 hora de antecedência, o desempenho permanece consistente, com NSE acima de 0,85, além de erro absoluto médio inferior a 10 cm. Esse resultado sugere que a estratégia de modelagem baseada no mecanismo de diferença (Δnível) contribuiu para capturar a dinâmica imediata do sistema, que ainda é fortemente condicionada ao estado atual da série (Iqbal et al., 2021).

A partir de 2 horas, observa-se redução gradual dos indicadores. Em 3 horas de antecedência, o NSE atinge 0,5076, aproximando-se do limite de 0,50, usualmente considerado como o limiar mínimo de aceitabilidade em modelagem hidrológica (Marcos Junior et al., 2023). Essa perda de eficiência decorre do aumento das incertezas associadas à propagação da onda de cheia e à redução da memória hidrológica do sistema. Conforme o horizonte se amplia, o modelo passa a depender menos da persistência imediata e mais de padrões históricos de maior complexidade, o que se reflete na elevação do RMSE para valores superiores a 25 cm.

Nota-se, contudo, uma discreta recuperação do coeficiente de determinação (R^2) nos horizontes de 4,5 e 5 horas, aumentando de 0,5377 para 0,6336. Esse comportamento, também observado por Magro (2021) e Souza e Silva (2025), pode estar relacionado à identificação de tendências de maior escala, como recessões lentas ou elevações graduais, que dominam a série após a dissipação da variabilidade de curtíssimo prazo. Ainda que os erros absolutos permaneçam superiores aos observados nos primeiros horizontes, a melhoria no R^2 e no NSE sinaliza que o modelo recupera parte de sua capacidade explicativa ao alinhar-se à tendência geral do hidrograma.

Horizonte (h)	R^2	NSE	MAE (m)	RMSE (m)	R^2 P90.	MAE P90. (m)
0.5	0.9860	0.9854	0.0259	0.0443	0.9584	0.0437
1.0	0.9454	0.9416	0.0544	0.0884	0.8491	0.1006
1.5	0.8663	0.8503	0.0939	0.1415	0.7405	0.1769
2.0	0.8015	0.7623	0.1172	0.1783	0.6421	0.2492
2.5	0.7051	0.6388	0.1462	0.2189	0.5513	0.3449
3.0	0.5971	0.5076	0.1775	0.2568	0.5453	0.4598
3.5	0.5464	0.4345	0.1954	0.2753	0.5502	0.5172
4.0	0.5377	0.4288	0.1953	0.2768	0.4730	0.5314
4.5	0.5826	0.4838	0.1889	0.2633	0.4272	0.4879
5.0	0.6336	0.5502	0.1661	0.2459	0.3096	0.4436

Tabela 02: Métricas de desempenho do modelo XGBoost nos horizontes de 30 a 300 minutos para o rio Acari. Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De maneira geral, os resultados apontam uma maior robustez operacional para previsões até o horizonte de 2 horas, intervalo no qual os indicadores mantêm desempenho estatisticamente consistentes. Para horizontes superiores, embora o modelo preserve capacidade explicativa moderada, observa-se ampliação da incerteza preditiva com parte da variabilidade extrema sendo subestimada, aspecto que deve ser considerado em aplicações voltadas a sistemas de alerta hidrológico.

Na avaliação do desempenho do modelo em eventos extremos (P90) o desempenho ainda se mostra elevado no horizonte de 30 minutos (0,5 h), com R^2 P90. de 0,9584 e MAE P90 de apenas 4,37 cm. Adicionalmente, 98,3% das previsões situaram-se dentro de uma faixa de ±30 cm em relação ao valor observado. Esses resultados indicam forte capacidade de representação dos picos no curtíssimo prazo, demonstrando que o modelo consegue preservar tanto a variabilidade quanto a magnitude dos eventos extremos até em ambientes hidrologicamente instáveis como o do Rio Acari.

Até o horizonte de 1 hora, o desempenho ainda permanece robusto, com R^2 de 0,8491 e 94,6% das previsões dentro de 30 cm de erro. Contudo, a partir de 2 horas, a degradação do desempenho fica evidente ao compararmos com as métricas globais analisadas anteriormente. Aos 120 minutos, enquanto o modelo global ainda mantém certa capacidade explicativa, o percentual de previsão dentro de 30 cm para extremos cai para 71,4%, e reduz novamente para apenas 30,6% aos 180 minutos. Essa diferença evidencia que a perda de desempenho é mais sensível nos eventos de maior magnitude, os mais relevantes do ponto de vista operacional.

Esse comportamento é coerente com a própria composição estatística da amostra, uma vez que valores acima de P90 representam parcela reduzida do conjunto de treinamento. A menor frequência de picos históricos limita a capacidade de generalização em horizontes mais longos. Além disso, modelos empíricos, tendem a apresentar restrições na extrapolação para valores além do intervalo observado, o que pode contribuir para subestimação da magnitude dos eventos quando a persistência hidrológica deixa de ser dominante (Magro, 2021).

Embora o R^2 ext. permaneça acima de 0,54 até 3 horas, o MAE aumenta de forma consistente, atingindo 45,98 cm nesse horizonte. Esse aumento sugere maior dispersão residual nos picos mais intensos, confirmando a ampliação da incerteza preditiva à medida que o horizonte se expande.

Mesmo com essa redução de desempenho em horizontes superiores a 2,5 horas, o modelo ainda apresenta potencial operacional relevante no curto prazo. Erros médios inferiores a 0,10 m até 1 hora de antecedência representam contribuição relevante para sistemas de monitoramento e apoio à decisão em bacias urbanas de resposta rápida, especialmente em estratégias de alerta imediato.

Além das métricas quantitativas apresentadas nas seções anteriores, foram realizadas análises gráficas complementares para aprofundar a interpretação do desempenho do modelo sob diferentes perspectivas. O painel de gráficos de dispersão, construído para todos os horizontes avaliados, e apresentado na Figura 05 permite examinar visualmente a relação entre valores observados e estimados.

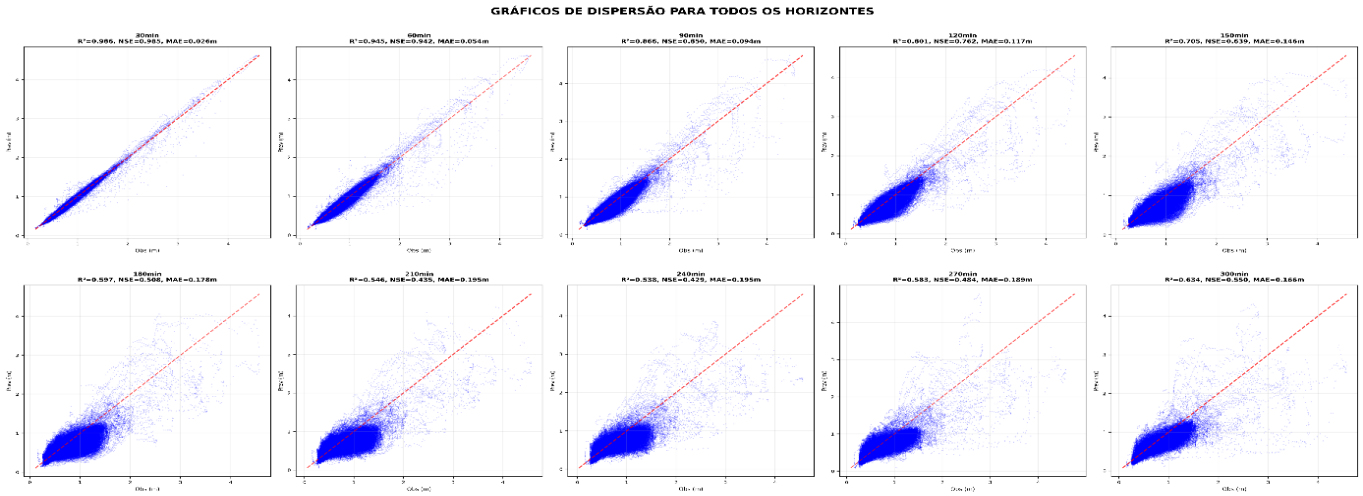


Figura 05: Gráficos de dispersão.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Nos horizontes de 0,5 e 1 hora, há uma forte concentração dos pontos ao longo da reta 1:1, com baixa dispersão e ausência de padrões sistemáticos evidentes. Esse comportamento confirma os altos valores de R^2 e NSE apresentados previamente.

À medida que o horizonte de previsão aumenta, a dispersão dos pontos em torno da reta ideal torna-se mais visível. A partir de 2 horas, nota-se uma maior variabilidade residual, especialmente nos valores mais elevados da série. Tal padrão confirma a tendência de subestimação dos picos em horizontes mais longos, comportamento coerente com a redução observada nas métricas associadas aos eventos extremos.

Complementarmente, o gráfico comparativo das últimas 1000 leituras (Figura 06) permite avaliar o comportamento do modelo em sequência temporal contínua, aproximando a análise de um cenário operacional real.

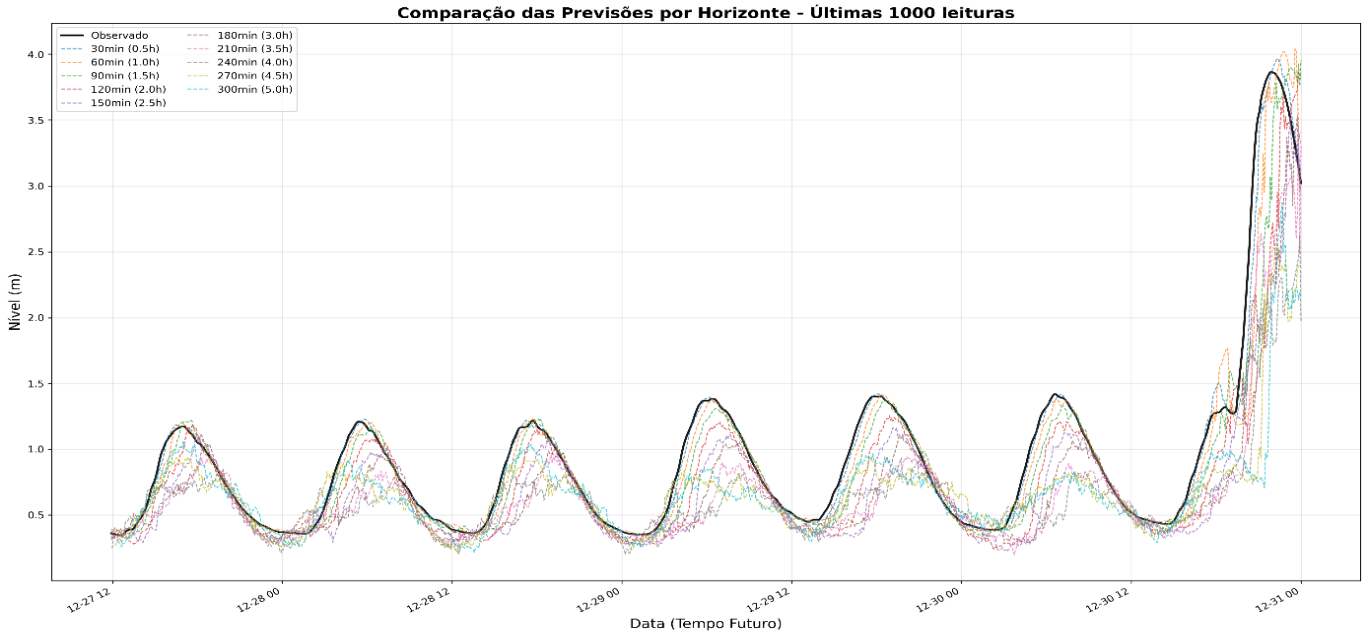


Figura 06: Gráfico comparativo das últimas 1000 leituras.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Nos horizontes de curto prazo, as curvas de previsão acompanham de forma consistente as oscilações da série observada, reproduzindo tanto as recessões quanto os episódios de elevação rápida. À medida que o horizonte se amplia, a resposta modelada apresenta maior suavização e pequena defasagem temporal, especialmente nos trechos de subida abrupta. Esse comportamento reforça a interpretação da influência da persistência hidrológica ser determinante no desempenho de curtíssimo prazo, enquanto horizontes maiores passam a depender de padrões históricos, que ampliam a incerteza associada às transições rápidas.

Do ponto de vista aplicado, essas análises visuais corroboram com os resultados quantitativos onde o modelo apresenta maior consistência até aproximadamente 2 horas, mantendo resultados compatíveis com aplicações de monitoramento em tempo real. Para horizontes superiores, embora o comportamento da série ainda seja reproduzido, a suavização nos picos indica necessidade de cautela em aplicações voltadas à antecipação de eventos críticos.

Considerações Finais

O presente estudo avaliou o desempenho do modelo XGBoost na previsão de nível do rio Acari em horizontes entre 0,5 e 5 horas, com ênfase especial na capacidade de representação em eventos extremos (acima de P90). Os resultados indicaram robustez estatística nas previsões até 120 minutos, a partir desse ponto, ocorre degradação gradual do desempenho. Essa redução é ainda mais evidenciada quando consideramos apenas os eventos extremos, indicando maior sensibilidade na previsão dos picos ao aumento do horizonte temporal.

Do ponto de vista aplicado, os resultados sugerem que o modelo apresenta potencial relevante para integração em sistemas de monitoramento e alerta de curto prazo em bacias urbanas de resposta rápida. A capacidade de fornecer estimativas com erro médio reduzido até 60 minutos de antecedência pode contribuir para qualificar a tomada de decisão em cenários de risco hidrológico, especialmente quando associada a estratégias de gestão adaptativa.

Entre as limitações do estudo, destaca-se a utilização exclusiva de informações históricas de nível e precipitação. A incorporação de variáveis meteorológicas adicionais ou outras previsões pode ampliar a capacidade de antecipação em horizontes, especialmente superiores a 2 horas. Além disso, investigações futuras podem explorar técnicas de balanceamento para eventos extremos, calibração orientada a picos ou abordagens híbridas que combinem aprendizado de máquina com componentes físico-hidrológicos.

Em síntese, os resultados evidenciam que modelos baseados em aprendizado de máquina, quando adequadamente estruturados, podem contribuir para a previsão hidrológica de curto prazo em ambientes urbanos, desde que suas limitações sejam explicitamente consideradas no contexto operacional.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) através do Convênio CAPES/UNESP Nº 951420/2023. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) pelo apoio técnico científico oferecido, e a ANA e a CAPES pelo apoio ao ProfÁgua aportado até o momento.

Referências Bibliográficas

ALERTA-RIO. Sistema Alerta Rio: informações das estações. Disponível em: https://www.sistema-alerta-rio.com.br/info-estacoes/. Acesso em: 8 fev. 2026.

CHEN, Tianqi; GUESTRIN, Carlos. XGBoost: a scalable tree boosting system. In: ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining 22., 2016, San Francisco. Proceedings [...]. New York: Association for Computing Machinery, 2016. DOI: https://doi.org/10.1145/2939672.2939785.

FILHO, F. L. S.; QUILES, M. G.; SANTOS, L. B. L. Random Forest para modelagem hidrológica na cidade de São Paulo. Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, São José dos Campos, SP, v. 11, n. 1, 2025. Trabalho apresentado no XLIII CNMAC, Porto de Galinhas – PE, 2024.

GAO, Z. et al. Constructing a machine learning model for rapid urban flooding forecast in sloping cities along the Yangtze River: a case study in Jiujiang. Water, Basel, v. 16, n. 12, p. 1694, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/w16121694.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

INEA – INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. Sistema de alerta de cheias. Disponível em: https://alertadecheias.inea.rj.gov.br/mapa.php. Acesso em: 8 fev. 2026.

INSTITUTO DECODIFICA. Retratos das enchentes. [S.l.], 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2021: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

QBAL, N. et al. Groundwater level prediction model using correlation and difference mechanisms based on boreholes data for sustainable hydraulic resource management. IEEE Access, v. 9, p. 96092–96113, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3094735.

MAGALHÃES, L. E. Sistema que monitora em tempo real nível de água dos rios está parado desde 2017. O Globo, Rio de Janeiro, 12 abr. 2019. Disponível em: https://oglobo.globo.com/rio/sistema-que-monitora-em-tempo-real-nivel-de-agua-dos-rios-esta-parado-desde-2017-23593174. Acesso em: 8 fev. 2026.

MAGRO, R. B. Aplicação de redes neurais artificiais para previsão de inundação em uma área urbana. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2021.

MARCOS JUNIOR, A. D. et al. Combining traditional hydrological models and machine learning for streamflow prediction. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 29, e11, 2024. DOI: https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420230105.

MARCOS JUNIOR, A. D. et al. PREVISÕES DE VAZÕES AFLUENTES COM MODELOS DE MACHINE LEARNING APLICADOS AO RESERVATÓRIO DE TRÊS MARIAS. In: XXV SBRH – Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Centro de Convenções AM Malls – Sergipe, 19 a 24 nov. 2023. Anais […]. ISSN 2318-0358. Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=15292 . Acesso em: 8 fev. 2026.

MESQUITA, L. A. F. Redes neurais artificiais aplicadas a séries temporais para predição de enchentes. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.
MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos brasileiros. Brasília: MMA, 2016.

NABILAH, L.; HAKIM, L. Hybrid PSO-XGBoost model for accurate flood risk assessment. Journal of Applied Informatics and Computing, v. 9, n. 6, p. 3681–3688, 2025. DOI: https://doi.org/10.30871/jaic.v9i6.11094.

NIAZKAR, M. et al. Applications of XGBoost in water resources engineering: a systematic literature review (Dec 2018–May 2023). Environmental Modelling and Software, v. 174, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.105971.

PUGAS, A. Modelagem dos desastres hidrometeorológicos em Santa Catarina para análise da efetividade do sistema de alerta da Defesa Civil. Dissertação (Mestrado Profissional em Clima e Ambiente) – INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA, Florianópolis, 2024.

RIO DE JANEIRO (Município). Rios de Janeiro: um manual dos rios, canais e corpos hídricos da cidade do Rio de Janeiro. 1. ed. Rio de Janeiro:Fundação Instituto das Águas do Município do Rio de Janeiro – RIO-ÁGUAS, 2020.

RIO DE JANEIRO (Município). Plano municipal de saneamento básico da cidade do Rio de Janeiro: drenagem e manejo de águas pluviais urbanas. Rio de Janeiro: Secretaria Municipal de Saneamento e Recursos Hídricos; Fundação Instituto das Águas do Município do Rio de Janeiro – RIO-ÁGUAS, 2015.

RODRIGUES, R.; MARTINS, C. Modelos de aprendizado na predição de nível de rios para detecção de falhas em estações hidrotelemétricas. In: WORKSHOP DE COMPUTAÇÃO APLICADA À GESTÃO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS (WCAMA), 16. , 2025, Maceió/AL. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2025. p. 306-315. ISSN 2595-6124. DOI: https://doi.org/10.5753/wcama.2025.9371.

SANTOS, L.B.L. et al. A Neural Network-Based Hydrological Model for Very High-Resolution Forecasting Using Weather Radar Data. Eng., 2023, 4, 1787-1796. DOI: https://doi.org/10.3390/eng4030101.

SOUZA, I. A.; SILVA, V. A.. Modelos de Aprendizado de Máquina para Previsão de Nível de Inundação na Bacia do Rio Almada – Sul da Bahia, Brasil. SSRN, 2025. DOI: http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5580376.

TUCCI, Carlos E. M. Águas urbanas. Estudos Avançados, São Paulo, Brasil, v. 22, n. 63, p. 97–112, 2008. Disponível em: https://revistas.usp.br/eav/article/view/10295. Acesso em: 08 fev. 2026.

XAVIER, C. A relação dos eventos de inundação com as características físicas da bacia hidrográfica: o caso da bacia do Rio Acari, Rio de Janeiro – RJ. TCC (Bacharel em Geografia) – UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA, Foz do Iguaçu - PR, 2022.

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE MACROGRENAGEM CONSIDERANDO CENÁRIOS DE CHUVAS EXTREMAS

1 Leonardo Lucas Santos Rondon, 2 Cristiano Gabriel Persch, 3 Igor Tavares dos Santos, 4 Leonardo Nascimento de Souza, 5 Gilson Passos Junior, 6 Pedro Franceschini Mombach

1 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: leonardolucassantosrondon@gmail.com; 2 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: cristiano.persch@ufmt.br 3 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: igor.santos7@sou.ufmt.br; 4 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: lleonardo.souza16@gmail.com; 5 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: enggilson.junior@gmail.com; 6 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: pfmombach@gmail.com

Palavras-chave: eventos extremos; sobrecarga; drenagem urbana.

Resumo

O atual estudo avaliou o desempenho hidráulico do sistema de macrodrenagem da bacia do Córrego do Gambá, localizado na zona urbana da cidade de Cuiabá-MT, considerando cenários de chuvas extremas. A análise do sistema foi feita por modelagem hidrológica e hidráulica, sendo realizada por meio do software SWMM (*Storm Water Management Model*), com simulações de chuvas de projeto considerando critérios de adaptação a mudanças climáticas incorporadas nas frequências dos eventos, sendo estabelecido chuvas com o tempo de retorno de 3, 12, 25 e 75 anos.

Os resultados evidenciaram que, mesmo para tempos de retorno inferiores, alguns trechos do sistema já operam sob condições de sobrecarga hidráulica, indicando vulnerabilidade estrutural da rede existente. À medida que a magnitude das chuvas aumentou, houve um acréscimo significativo no número de trechos em regime crítico, sendo o cenário de 75 anos o mais severo, com oito trechos apresentando funcionamento inadequado. Foram propostas readequações geométricas com base em seções comerciais disponíveis, ao qual observou-se que determinados dispositivos necessitaram de múltiplas intervenções ao longo dos diferentes cenários simulados, com ampliações superiores a 80% em alguns casos.

Conclui-se que a infraestrutura atual, dimensionada segundo critérios tradicionais, demonstra limitações frente a eventos extremos causados pela não estabilidade climática, reforçando a necessidade de estratégias integradas de adaptação que envolvam não apenas o redimensionamento estrutural, mas também medidas voltadas à redução do escoamento superficial e ao planejamento urbano flexível.

Introdução

Com a implementação e atualização do novo marco legal do saneamento básico (Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020), a implementação dos quatro eixos (abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas) se tornam condições determinantes para o bem-estar da sociedade no meio urbano. O crescimento populacional e o intenso uso e ocupação do solo acompanhado do fenômeno das mudanças climáticas alterando os regimes hidrológicos (Grimm *et al*., 2008; Tomaz, 2011; IPCC, 2022), acarreta uma série de problemas quanto a eficiência dos sistemas de drenagem urbana, como alagamentos e inundações (Silva *et. al*., 2018). Nesse contexto, muitas cidades precisam readaptar suas infraestruturas da rede de micro e macrodrenagem considerando eventos hidrológicos extremos, favorecendo maior resiliência do sistema urbano de drenagem (Tucci, 2007; Oliveira *et al*., 2019; Kourtis, 2021). No processo de readequação do sistema de drenagem, partindo de sistemas tradicionais, é importante conhecer a dinâmica do escoamento superficial que ocorre na bacia e seus canais. Dessa forma, existem diversas ferramentas (modelos), tais como SWMM (*Storm Water Management Model*), que permitem a simulação hidráulica e hidrológica, possibilitando entender a mecânica do escoamento superficial que ocorre na bacia (Rabori *et al*. 2017; Tucci, 2005).

O SWMM permite uma análise integrada dos processos hidrológicos e os hidráulicos. O módulo hidrológico simula o comportamento da chuva ao atingir o solo, considerando fatores como infiltração, acúmulo de água na superfície, impermeabilização, declividade, entre outros. Já o módulo hidráulico é baseado nas equações de Saint-Venant, que faz a propagação do escoamento no sistema de redes de drenagem (Aguiar *et al*. 2007; Costa; Koide, 2014; Tsuji *et al*. 2019).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a dinâmica hidráulica de uma bacia urbana considerando um cenário de chuvas extremas. A análise consistirá na identificação e mapeamento dos condutos existentes e sua dinâmica de escoamento atual, e a sua posterior readequação frente a cenários de chuvas considerando eventos extremos.

Material e Métodos

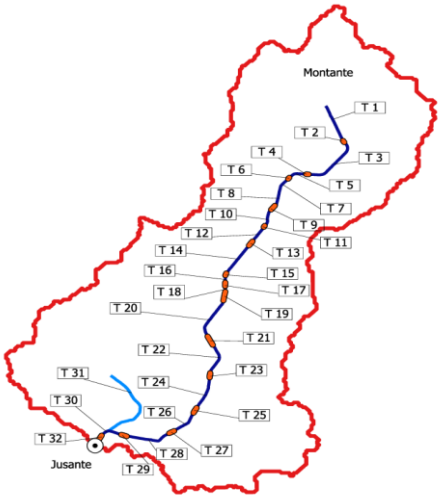
Área de estudo

A área de estudo corresponde a bacia do Córrego do Gambá, localizada na região central da cidade de Cuiabá-MT. A delimitação da bacia foi realizada por meio de um modelo digital de elevação *Alos Palsar* com 12,5 metros de resolução, e tem área de aproximadamente 4,97 km². A região é inteiramente urbanizada contendo áreas residenciais e comerciais, com predomínio de solos predominantemente argilosos, com um CN estimado de 92 (Jaafar *et al.* 2019).

O sistema de macrodrenagem da bacia é representado por um canal artificial de comprimento aproximado de 3,70 km, com seção transversal predominantemente trapezoidal. Ao longo desse canal ocorre a presença de singularidades, representadas

por bueiros e pontilhões, inseridos devido a vias públicas de deslocamento. A Figura 01 apresenta as informações do canal ao longo do talvegue principal e a Figura 02 apresenta as características gerais das sub-bacias e imagens de alguns locais analisados.

Trecho	Geometria	L (m)	Dimensões	Trecho	Geometria	L (m)	Dimensões	Imagem Ilustrativa
T 1	Ta	182,3	$^{\sigma}$(2,5 x 1,48 x 3,7)	T 17	Br	28,0	$^{\alpha}$2 x $^{\beta}$[3,5 x 1,5]	
T 2	Bc	15,5	$^{\alpha}$3 x $^{\gamma}$[1]	T 18	Ta	45,0	$^{\sigma}$(4,8 x 1,92 x 6,5)	
T 3	Ta	414,6	$^{\sigma}$(3,1 x 1,52 x 4,1)	T 19	Br	70,0	$^{\sigma}$2 x $^{\beta}$[2,2 x 1,5]	
T 4	Br	16,5	$^{\beta}$[2,45 x 1,3]	T 20	Ta	320,0	$^{\sigma}$(4,8 x 1,92 x 6,5)	
T 5	Ta	123,0	$^{\sigma}$(3 x 1,64 x 4,5)	T 21	Br	75,0	$^{\sigma}$2 x $^{\beta}$[2,8 x 1,7]	
T 6	Br	16,0	$^{\beta}$[2,75 x 1,3]	T 22	Ta	255,0	$^{\alpha}$(6,2 x 2,13 x 7,3)	
T 7	Ta	70,0	$^{\sigma}$(3 x 1,64 x 4,5)	T 23	Br	20,0	$^{\alpha}$2 x $^{\beta}$[2,8 x 1,7]	
T 8	Ta	162,0	$^{\sigma}$(4,5 x 1,64 x 6)	T 24	Ta	275,0	$^{\alpha}$(6,2 x 2,13 x 7,3)	
T 9	Bc	37,0	$^{\alpha}$2 x [1,2]$^{\gamma}$ + $^{\alpha}$3 x $^{\gamma}$[1]	T 25	Br	18,5	$^{\alpha}$2 x $^{\beta}$[2,6 x 2,1]	
T 10	Ta	141,0	$^{\sigma}$(4,25 x 1,78 x 5,6)	T 26	Ta	235,0	$^{\sigma}$(7,5 x 2,10 x 8,8)	
T 11	Br	12,5	$^{\alpha}$2 x $^{\beta}$[2 x 1,80]	T 27	Tf	7,0	$^{\sigma}$(7,5 x 1,7 x 8,8)	
T 12	Ta	150,0	$^{\sigma}$(4,25 x 1,78 x 5,6)	T 28	Ta	340,0	$^{\sigma}$(7,5 x 2,10 x 8,8)	
T 13	Br	12,5	$^{\alpha}$2 x $^{\beta}$[2 x 1,80]	T 29	Tf	8,5	$^{\sigma}$(7,5 x 2 x 8,8)	
T 14	Ta	280,0	$^{\sigma}$(4,25 x 1,78 x 5,6)	T 30	Ta	170,0	$^{\sigma}$(7,5 x 2,10 x 8,8)	
T 15	Bq	17,5	$^{\alpha}$2 x $^{\beta}$[1,5 x 1,5]	T 31	Ta	620,0	$^{\sigma}$(2,5 x 1,48 x 3,7)	
T 16	Ta	55,0	$^{\sigma}$(5 x 1,91 x 6,2)	T 32	Bq	35,0	$^{\alpha}$2 x $^{\beta}$[2 x 1,6]	



Legenda: Ta = Trápezio aberto; Bc = Bueiro circular; Br = Bueiro retangular; Bq = Bueiro quadrado; Tf = Trápezio fechado; L = comprimento; $^{\sigma}$(b: base menor; y: altura; B: Base maior); $^{\gamma}$[diâmetro]; $^{\alpha}$quantidade de células; $^{\beta}$[base x altura].

Figura 01: Descrição da rede de macrodrenagem. Fonte: Os autores (2025).

Características	Valores máximos	Valores mínimos
Área (ha)	85,3	2,8
Declividade Média (%)	14,2	4,8
Largura Característica W (m)	266,7	61,6

Imagem ilustrativa

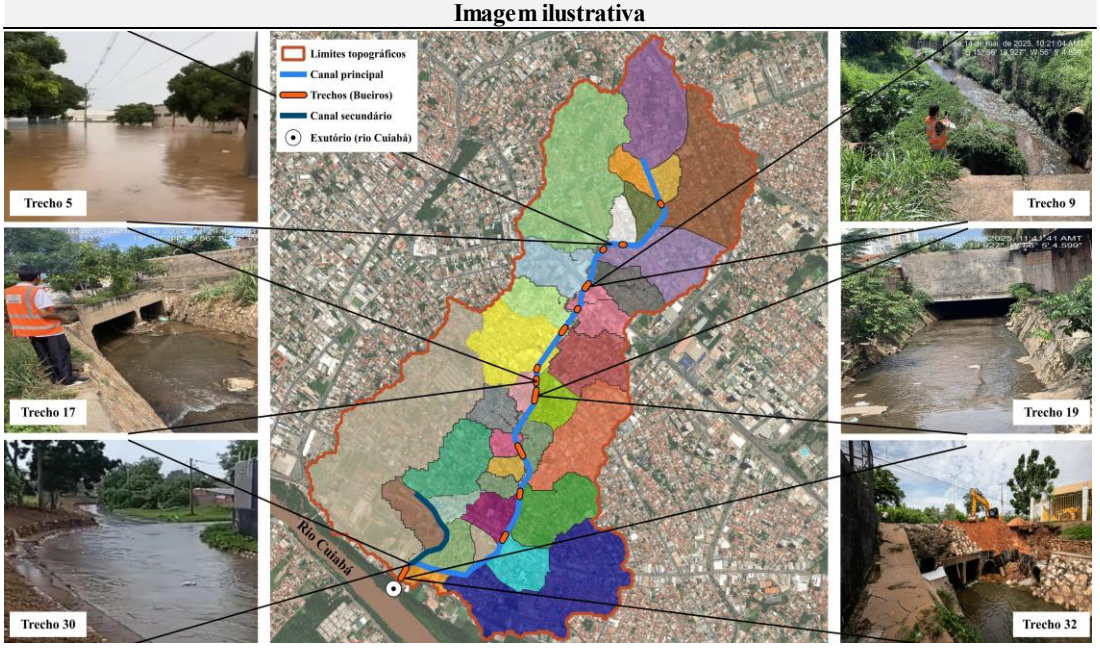


Figura 02: Características gerais das sub-bacias e imagens dos locais analisados. Fonte: Os autores (2025).

Implementação no SWMM

Para implementar a bacia no SWMM, a área de drenagem foi dividida em 33 sub-bacias representando áreas de contribuição para o canal principal (Figura 02). Cada sub-bacia foi considerada uniforme, distintas entre si em termos geométricos (áreas variando entre 85,30 e 2,82 ha) e ocupação (residencial e comercial). Já o valor de CN foi considerado uniforme para toda a bacia, uma vez que existe predominância constante das características de solo e ocupação. Foram calculados os valores de W (largura característica), e estimado os valores de área impermeável/permeável por meio de classificação supervisionada, além dos parâmetros de rugosidade e abstrações iniciais.

As características dos canais (Figura 1) foram obtidas a partir de levantamentos em campo, procurando mensurar valores de comprimento, cotas, dimensões e tipo de material. Na implementação no SWMM, os parâmetros de rugosidade foram estimados a partir do material constituinte. Para as simulações foram inseridas chuvas de projetos baseadas na equação de IDF de Cuiabá (Leão, D. S. *et al*., 2025) com intervalos de tempo (5 minutos) e duração total de 35 minutos (estimado a partir do tempo de concentração), atendendo as premissas de duração total maior que o tempo de concentração e intervalos menores ou iguais a 1/5 do tempo de concentração.

Para a consideração de cenários associados à ocorrência de eventos extremos, a definição das chuvas de projeto incorporou adaptações relacionadas a magnitude dos tempos de retorno, conforme proposto por Paiva, Collischonn *et al*. (2024), no estudo "*Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática*". Os autores sugerem substituir os tradicionais tempos de retorno de 2, 5, 10 e 25 anos (para estimativa da precipitação de projeto), por tempos de retornos maiores, equivalentes a 3, 12, 25 e 75 anos respectivamente, ou seja, um aumento na intensidade da chuva. Essa abordagem indicada pelos autores fundamentou-se em princípios consistentes, elaborada a partir da análise de séries históricas longas e representativas, análises de eventos hidrológicos extremos e a comparação desses registros observados com projeções obtidas a partir de modelos climáticos globais (GCMs) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

A partir da implementação da bacia e seu sistema de macrodrenagem no SWMM, procedeu-se com as simulações de chuvas de projeto considerando os tempos de retorno (TR) de 3, 12, 25 e 75 anos. Os valores de tempos de retorno menores são valores comumente usados apenas para o dimensionamento de estruturas de microdrenagem. Todavia, optou-se por simular o sistema com tempos de retorno mais baixos justamente com o objetivo de enfatizar que mesmo em intensidades de chuvas menores, que ocorrem com maior frequência, as estruturas já demonstram sinais de sobrecarga hidráulica, o que é agravada ainda mais em condições de eventos extremos.

Definidas as chuvas de projeto incorporadas as condições de cenários de chuvas extremas, foram realizadas simulações no modelo dos processos hidrológicos (geração de escoamento nas sub-bacias) e hidráulicos (propagação no canal), buscando identificar os elementos da rede de drenagem que operaram sob condições de sobrecarga hidráulica. O critério adotado foi de que a relação entre a altura da lâmina d'água e a altura/diâmetro do bueiro menor que 75% ($y/D \leq 0{,}75$), conforme indicado por Porto (2006) indicando revanche de 25%. Essa avaliação concentrou-se em todos os trechos procurando identificar pontos onde o nível da água superou o limite de condições de escoamento livre ou então em sobrecarga. Após a identificação dos pontos de sobrecarga, foi proposto um redimensionamento dos trechos críticos, alterando-se as dimensões das seções transversais. O processo de redimensionamento considerou a adoção de diâmetros comerciais imediatamente superiores (área transversal maior), com base nas recomendações do álbum de projetos-tipos de dispositivos de drenagem (DNIT, 2022).

Resultados e Discussão

A Tabela 01 apresenta os trechos com sobrecarga e o respectivo redimensionamento para os diferentes tempos de retorno.

Tempo de retorno	Trechos com Sobrecarga	Readequação da geometria (m)	Aumento da área da seção transversal em relação a seção original (%) (Figura 01)
3	T 32	BDCC / $^{\sigma}$2 x $^{\beta}$[2 x 2]	25,0
12	T 9	BDTC + BTTC / {$^{\sigma}$2 x $^{\gamma}$[1,5]} + {$^{\sigma}$3 x $^{\gamma}$[1,5]}	56,3
	T 17	BDCC / $^{\sigma}$2 x $^{\beta}$[3 x 2]	14,3
	T 19	BDCC / $^{\sigma}$2 x $^{\beta}$[2,5 x 2]	51,5
	T 32	BDCC / $^{\sigma}$2 x $^{\beta}$[2 x 2,5]	56,3
25	T 4	BSCC / $^{\sigma}$1 x $^{\beta}$[2 x 2]	25,6
	T 6	BSCC / $^{\sigma}$1 x $^{\beta}$[2 x 2]	12,0
	T 9	BDTC + BTTC / {$^{\sigma}$2 x $^{\gamma}$(1,5)} + {$^{\sigma}$3 x $^{\gamma}$(1,5)}	56,3
	T 17	BDCC / $^{\sigma}$2 x $^{\beta}$[3 x 2]	14,3
	T 19	BDCC / $^{\sigma}$2 x $^{\beta}$[3 x 2]	81,8
	T 23	BDCC / $^{\sigma}$2 x $^{\beta}$[3 x 2,5]	57,6
	T 32	BDCC / $^{\sigma}$2 x $^{\beta}$[2 x 2,5]	56,3
75	T 4	BSCC / $^{\sigma}$1 x $^{\beta}$[2 x 2]	25,6
	T 6	BSCC / $^{\sigma}$1 x $^{\beta}$[2 x 2]	12,0
	T 9	BDTC + BTTC / {$^{\sigma}$2 x $^{\gamma}$(1,5)} + {$^{\sigma}$3 x $^{\gamma}$(1,5)}	56,3
	T 15	BDCC / $^{\sigma}$2 x $^{\beta}$[2 x 2]	18,5
	T 17	BDCC / $^{\sigma}$2 x $^{\beta}$[3 x 2,5]	42,9
	T 19	BDCC / $^{\sigma}$2 x $^{\beta}$[2,5 x 2,5]	89,4
	T 23	BDCC / $^{\sigma}$2 x $^{\beta}$[3 x 2,5]	57,6
	T 32	BDCC / $^{\sigma}$2 x $^{\beta}$[3 x 2]	87,5

Legenda: BDCC = Bueiro duplo celular de concreto; BDTC = Bueiro duplo tubular de concreto; BTTC = Bueiro triplo tubular de concreto; BSCC = Bueiro simples celular de concreto; $^{\sigma}$quantidade de células; $^{\beta}$[base x altura]; $^{\gamma}$(diâmetro).

Tabela 01: Trechos com sobrecarga e respectivo redimensionamento para os diferentes tempos de retorno. Fonte: Os autores (2025).

A Tabela 02 mostra os valores de 'y/D' para cada seção transversal nos trechos, referente ao redimensionamento necessário para atender cada tempo de retorno.

Conforme apresentado, é possível observar que para um TR de 3 anos, considerado baixo e não usual para sistemas de macrodrenagem, o trecho (T32, a jusante) passou a operar em condição de sobrecarga, com valor de y/D de '0,80', indicando a necessidade de ampliação da seção transversal, passando de 6,40 m² (seção original) para 8 m² (seção redimensionada), o que representa um aumento de 25% em relação a geometria original, e com isso, passando a operar com uma lâmina (y/D) de '0,64'.

Para TR de 12 anos, quatro trechos passaram a operar em sobrecarga: T9, T17, T19 e T32. O trecho T32, embora redimensionado no cenário de TR3, não foi suficiente para chuvas de maior intensidade, evidenciando que o redimensionamento inicial não foi suficiente para garantir condições hidráulicas adequadas em eventos de maior magnitude, sendo assim, a geometria readequada passou de 6,40m² (seção original) para 10m², representando um aumento de 56,3% em relação a área original. Já o trecho T9 foi redimensionado para a dimensão imediatamente superior, saindo de seção transversal de área 6,25 m² (original) para 8,84 m², representando um aumento total de 56% e operando com o nível da água de '0,56', conforme apresentado pela Tabela 02. Os trechos T17 e T19 foram readequados para BDCC, com 12 m² de seção transversal total, sendo um aumentando de 14% e 51% respectivamente.

Tempo de retorno	Trechos com Sobrecarga	y / D (seção original; Figura 01)	y / D (geometria redimensionada para cada TR; Tabela 01)
3	T 32	0,80	0,64
12	T 9	0,82	0,56
	T 17	0,77	0,53
	T 19	0,88	0,56
	T 32	1,00	0,63
25	T 4	0,76	0,54
	T 6	0,77	0,56
	T 9	0,86	0,60
	T 17	0,85	0,59
	T 19	0,89	0,64
	T 23	0,84	0,59
	T 32	1,00	0,69
75	T 4	0,86	0,63
	T 6	0,89	0,64
	T 9	0,89	0,69
	T 15	0,83	0,63
	T 17	0,91	0,56
	T 19	0,90	0,65
	T 23	0,87	0,67
	T 32	1,00	0,66

Tabela 02: Valores de y/D para cada seção transversal nos trechos, referente ao redimensionamento necessário para atender o tempo de retorno. Fonte: Os autores (2025).

Para o TR de 25 anos, três trechos operaram em condição de sobrecarga, entre eles T4 e T6, situados na porção mais a montante da bacia (Figuras 01 e 02). O fato de já apresentarem sobrecarga mesmo com menor área de contribuição evidencia a vulnerabilidade hidráulica dessas seções. O redimensionamento resultou em aumentos de 25,6% e 12% para T4 e T6, respectivamente.

O trecho T23, por sua vez, registrou relação y/D de 0,84, valor elevado mesmo diante de uma área total de 9,52 m² (Figura 01). Adotando o mesmo critério aplicado aos demais bueiros — seleção da seção transversal imediatamente superior que atendesse ao tirante mínimo estabelecido por Porto (2006) — a área passou para 15 m², incremento correspondente a 57% em relação à seção original.

Os trechos T9, T17 e T32 mantiveram as dimensões definidas para o TR de 12 anos, com relações y/D de 0,60, 0,59 e 0,69, respectivamente, permanecendo dentro da faixa do tirante máximo adotado. Por fim, o trecho T19 necessitou alteração, com a área sendo ampliada para 12 m², o que representa um acréscimo de aproximadamente 81,8% em relação à seção atual (Tabela 01) — aumento relativamente expressivo entre os trechos analisados.

Para o evento com período de retorno de 75 anos, verificou-se a condição mais crítica de funcionamento hidráulico da rede. Conforme apresentado nas Tabelas 01 e 02, esse evento resultou no maior número de trechos operando em sobrecarga, totalizando oito trechos. Tal condição já era esperada, considerando a maior intensidade pluviométrica associada a esse período de retorno.

As simulações indicaram que o trecho T19 exigiu um aumento de aproximadamente 89,4% na seção transversal (Tabela 01) para garantir condições adequadas de escoamento, evidenciando a magnitude da intervenção estrutural necessária. Com esse redimensionamento, a relação y/D atingiu 0,65, valor dentro do limite admissível adotado.

O bueiro T17 teve sua seção total ampliada em aproximadamente 43%, resultando em uma relação y/D de 0,56, o que indica folga hidráulica satisfatória para o cenário analisado. Já o trecho T32, posicionado praticamente no exutório, foi redimensionado alcançando uma área transversal de 12 m² (Tabela 01) e relação y/D de 0,66 (Tabela 02). Em comparação à seção original, o acréscimo foi de aproximadamente 87,5%, conforme ilustrado na Figura 01 e detalhado na Tabela 01.

Os resultados das simulações para todos os tempos de retorno evidenciam um aumento progressivo no número de trechos críticos à medida que a intensidade das precipitações se eleva. Esse comportamento é traduzido pela relação y/D (altura da lâmina d'água pelo diâmetro do conduto), apresentada na Tabela 02, que reflete o grau de utilização da capacidade hidráulica de cada estrutura. Nesse contexto, a ocorrência de eventos extremos em maior frequência tende a ampliar os pontos de vulnerabilidade no sistema de drenagem, reforçando a necessidade de intervenções que considerem cenários hidrológicos mais severos no dimensionamento das estruturas.

Considerações Finais

Os resultados obtidos permitem inferir que infraestruturas de drenagem urbana implantadas segundo critérios tradicionais apresentam limitações relevantes diante de eventos extremos. Para cenários com tempo de retorno de 75 anos, o volume de intervenções necessárias torna-se expressivo, indicando que a simples ampliação das seções geométricas pode não representar a estratégia mais eficiente ou economicamente viável.

Nesse sentido, os resultados apontam para a necessidade de abordagens integradas de adaptação, que transcendam o redimensionamento isolado das estruturas e incorporem medidas voltadas à redução do escoamento superficial. Soluções baseadas em infraestruturas verdes e híbridas, aliadas a readequações estruturais, mostram-se promissoras na atenuação tanto do volume quanto do pico de escoamento, conferindo maior viabilidade e sustentabilidade ao sistema de drenagem urbana frente à crescente recorrência de eventos extremos.

Cabe destacar, ainda, que o presente estudo não contemplou fatores como o assoreamento de trechos, o descarte de resíduos sólidos no interior dos canais e, sobretudo, os aspectos executivos e de viabilidade associados à substituição de bueiros em áreas urbanas consolidadas. A modelagem adotada constitui uma representação simplificada de uma dinâmica complexa e integrada, resultante da interação entre fenômenos naturais e ações antrópicas. Dessa forma, os resultados aqui apresentados requerem validação e confrontação com dados de eventos de chuva reais para maior confiabilidade e aplicabilidade prática.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), a Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia (FAET) e ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), pelo apoio durante todo o processo da construção do presente trabalho.

Referências Bibliográficas

AGUIAR, L. S. G.; TARGA, M. S.; BATISTA, G. T. Escoamento superficial na bacia hidrográfica do Ribeirão Itaim. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, 2007.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 16 jul. 2020.

COSTA, M. E. L.; KOIDE, S. Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada à drenagem urbana com SWMM. Brasília: Universidade de Brasília, 2014.

GRIMM, N. B. et al. Global change and the ecology of cities. **Science**, 2008.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability.* Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

JAAFAR, H. H.; AHMAD, F. A.; EL BEYROUTHY, N. GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design. **Scientific Data**, 2019.

KOURTIS, I. M.; TSIHRINTZIS, V. A. Adaptation of urban drainage networks to climate change: a review. **Science of the Total Environment**, 2021.

LEÃO, D. S.; PERSCH, C. G.; PEDROLLO, R. P. et al. *Chuvas intensas no estado de Mato Grosso.* Cuiabá: UFMT, 2025.

OLIVEIRA, A. K. B. et al. Avaliação de soluções de drenagem urbana para mitigação de inundações em áreas urbanizadas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2019.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. et al. *Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática.* Porto Alegre: UFRGS, 2024.

PORTO, R. de M. *Hidráulica básica.* São Carlos: EESC/USP, 2006.

RABORI, A. M.; GHAZAVI, R.; REVESHTY, M. A. Sensitivity analysis of SWMM model parameters for urban runoff estimation in semi-arid area. **Journal of Biodiversity and Environmental Sciences**, 2017.

ROCHA, Eider Gomes de Azevedo. **Conceitos básicos de hidrologia e drenagem para projetos rodoviários: módulo 5 – bueiros e pontes.** Brasília: DNIT, 2022.

SILVA, L. A.; SILVA, A. M.; COELHO, G.; PINTO, L. C. Soil map units of Minas Gerais State from the perspective of hydrologic groups. **Revista Ambiente & Água**, 2018.

TOMAZ, P. *Drenagem urbana e controle de erosão.* São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

TSUJI, T. M.; COSTA, M. E. L.; KOIDE, S. Diffuse pollution monitoring and modelling of small urban watershed in Brazilian Cerrado. **Water Science and Technology**, 2019.

TUCCI, C. E. M. *Drenagem urbana.* Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M. *Inundações urbanas.* Porto Alegre: ABRH, 2007.

EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO EXTREMA E SEUS IMPACTOS NA BARRAGEM DE CONTENÇÃO OESTE NO ALTO VALE DO ITAJAÍ/SC

1 Ariadne Guedes Dalanholli, 2 Maurilia de Almeida Bastos, 3 Adriano Vitor, 4 Fernanda Simoni Schuch
1 Instituto Federal de Santa Catarina, e-mail: dalanholliariadne@gmail.com; 2 Instituto Federal de Santa Catarina, e-mail: maurilia@ifsc.edu.br; 3Instituto Federal de Santa Catarina, e-mail: adriano.vitor@ifsc.edu.br; 4 Instituto Federal de Santa Catarina, e-mail: fernandass@ifsc.edu.br

Palavras-chave: Eventos de precipitação extrema; Tempo de Concentração; MERGE/NASA.

Resumo

É avaliado nesta pesquisa o impacto de eventos extremos de precipitação sobre a operação da Barragem de Contenção Oeste, localizada na sub-bacia hidrográfica do Rio Itajaí do Oeste, em Santa Catarina, no período de 2003 a 2023. Para isso, utilizou-se dados pluviométricos provenientes das plataformas MERGE/NASA e GPM, técnicas de interpolação espacial, mapeamento multitemporal do uso e ocupação do solo (2003, 2013 e 2023), cálculo do tempo de concentração da bacia e analisou-se a variação do nível da água no reservatório e a abertura de comportas, em função da ocorrência de eventos extremos. Os resultados mostraram, alterações no uso do solo marcado pela expansão de áreas antrópicas e redução do tempo de concentração ao longo de 20 anos, reforçando a maior suscetibilidade a inundações rápidas. Verificou-se que, diante desses cenários, a barragem opera repetidamente próxima de sua capacidade máxima, como evidenciado nos eventos de outubro e novembro de 2023, destacando limitações estruturais e operacionais frente às novas condições hidrológicas. Os resultados obtidos demonstraram que a sub-bacia hidrográfica do Rio Itajaí do Oeste apresenta crescente vulnerabilidade hidrológica devido à combinação entre alterações no uso e ocupação do solo ao longo das últimas décadas e à ocorrência de eventos extremos de precipitação. A análise dos níveis da Barragem Oeste confirmou que precipitações acumuladas em curtos períodos como no evento de novembro de 2023 elevam rapidamente o volume a montante, aproximadamente 3 dias após o registro do evento extremo, exigindo manobras operacionais emergenciais. Dessa forma, os achados evidenciam uma relação direta entre transformações territoriais, o comportamento hidrológico da barragem e a necessidade de operação da barragem.

Introdução

Nas últimas décadas, o aquecimento global e as mudanças climáticas tornaram os eventos extremos de precipitação mais frequentes e intensos, fato corroborado por evidências robustas indicadas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021). Este cenário se apresenta também no Estado de Santa Catarina, caracterizado por sua diversidade topográfica e regime pluviométrico elevado, os eventos extremos acarretam significativos impactos socioeconômicos, especialmente em regiões vulneráveis como o Vale do Itajaí, frequentemente afetado por enchentes (Defesa Civil de Santa Catarina, 2022). Para mitigar esses impactos, foram construídas estruturas hidráulicas, como as barragens de contenção.

Uma das principais medidas de mitigação em Santa Catarina na Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí é a Barragem Oeste, localizada no município de Taió. Inaugurada em 1973 com capacidade para 100 milhões de metros cúbicos de água, sua função principal é a de atenuar os picos de vazão do rio Itajaí do Oeste durante eventos de precipitação, reduzindo os impactos a jusante (Santa Catarina, 2026). Contudo, a maior frequência e intensidade desses eventos desafiam a operação da Barragem Oeste, tornando essencial avaliar sua resiliência e eficácia. Estudar esses impactos é fundamental para validar o desempenho da estrutura e aprimorar a gestão de riscos hidrológicos em Santa Catarina.

Recentemente, a Barragem Oeste enfrentou desafios críticos em eventos como os de outubro e novembro de 2023. Na ocasião, chuvas superiores a 300 mm no Alto Vale do Itajaí elevaram rapidamente o nível dos rios, exigindo a capacidade máxima de operação da estrutura (EPAGRI/CIRAM, 2023).

Com o aumento da frequência de eventos extremos de precipitação, este estudo analisa os impactos da precipitação extrema na operação da Barragem de Contenção Oeste (BCO), localizada em Taió/SC, entre 2003 e 2023, alinhada ao plano nacional de gestão de riscos, a pesquisa avalia o processo de operação da estrutura frente a precipitações críticas, correlacionando-as ao tempo de concentração da bacia e às mudanças no uso do solo.

Neste momento, portanto, é necessário explicar-se o que se considera eventos extremos de precipitação. Segundo Petrucci e Azevedo (2023), os eventos extremos de precipitação são caracterizados por volumes de chuva que excedem significativamente a média histórica. Embora sejam fenômenos naturais do sistema ambiental, podem desencadear desastres, especialmente em áreas vulneráveis. O Relatório Síntese de 2023 do IPCC projeta um aumento na ocorrência de episódios de precipitação intensa na região sudeste da América do Sul. Para Cardoso; Quadro e Bonetti (2020), o estado de Santa Catarina está entre as regiões mais favoráveis na ocorrência de eventos de precipitação extremos. A percepção de tais eventos se tornam visíveis através dos relatórios emitidos pela EPAGRI/CIRAM onde fora registrado, para o mês de outubro de 2023, volumes acima da média esperada para o período, com acumulados entre 350 mm e 450 mm em boa parte das cidades e regiões que alcançaram o marco surpreendente para o órgão de 500 mm.

Por estas questões levantadas sobre eventos extremos de precipitação, deve-se entender que, visando-se compreender o impacto destes na operação de uma barragem de contenção de cheias, o volume e a velocidade da água que atinge o barramento principal, dependem do tempo de concentração da bacia hidrográfica (tc), fator diretamente influenciado pelo uso e ocupação do

solo (UOS). Conforme Farias et al. (2021), a impermeabilização das superfícies reduz a infiltração e intensifica o escoamento superficial, aumentando a vulnerabilidade dos ecossistemas aquáticos às intervenções antrópicas (Dudgeon et al., 2006; Malmqvist & Rundle, 2002). Nesse contexto, se desenvolveu uma metodologia de pesquisa a qual é descrita no item a seguir.

Material e Método

Nesta pesquisa adotou-se abordagem quantitativa e exploratória, com base em dados geoespaciais e hidrometeorológicos para analisar os impactos de chuvas extremas na BCO, localizada no município de Taió (Figura 01), Estado de Santa Catarina. Através de geoprocessamento e séries históricas de precipitação e uso do solo buscou-se compreender o comportamento hidrodinâmico da Sub-bacia Hidrográfica do Rio Itajaí do Oeste (SBHRIO) e seu impacto na operação da barragem de contenção de cheias.

A SBHRIO localiza-se no Alto Vale do Itajaí, estendendo-se de Rio do Campo, de aproximadamente 1.100 m de altitude em relação ao nível do mar, seguindo em direção sudeste até encontrar o Rio Itajaí-Sul, em Rio do Sul. Essa área abrange cerca de 2 928 km² dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí-Açu (Gerber et al., 2018).



Figura 01: Localização da área de estudos - SBHRIO.
Fonte: Elaboração própria

Inicialmente, o estudo buscou dados sobre a geomorfologia, pedologia e rede de drenagem. O relevo predominante variou entre ondulado e colinoso, com uma litologia diversa, composta por rochas magmáticas, metamórficas e sedimentares. Os solos, majoritariamente argilosos, apresentaram alta suscetibilidade à erosão. A rede de drenagem da região é do tipo dendrítica e possui densidade média (Santa Catarina, 2025). De acordo com Vieira e Ribeiro (2021), o solo na região da sub-bacia do rio Itajaí-Oeste foi caracterizado pelo uso e ocupação do solo predominantemente utilizado por atividades agropecuárias, principalmente a agricultura familiar e silvicultura e pela presença de áreas urbanas em expansão, principalmente nas margens de cursos d'água. A cobertura vegetal de Mata Atlântica e foi gradualmente substituída pelas pastagens e cultivo, comprometendo a infiltração da água no solo. O cenário contribuiu para a dinâmica hidrológica local, e consequentemente o aumento do escoamento superficial, o fato de que as projeções para a região indicaram o aumento da silvicultura em áreas atualmente agrícolas (Preis, Franco e Varela, 2021). O mapeamento geomorfológico de Santa Catarina elaborado por Borges (2025) e validado por estudos regionais, indicou que a SBHRIO, localizada na porção oeste da bacia do rio Itajaí, insere-se predominantemente na unidade geomorfológica do Planalto Dissecado de Lajes, onde um planalto foi profundamente erodido pela ação de rios e outros agentes naturais ao longo do tempo geológico, uma subdivisão do Planalto Meridional. A Formação Serra Geral foi marcante na geologia local, composta por derrames basálticos amplamente distribuídos, característica da cobertura da Bacia do Paraná no estado de Santa Catarina (Wildner et al., 2014).

Após a caracterização inicial da área de estudos (SBHRIO) três grandes etapas foram desenvolvidas para se atingir o objetivo da pesquisa: a determinação dos eventos extremos na área, o cálculo do tempo de concentração (tc) e a análise dos dados fluviométricos e de funcionamento das comportas da barragem. Ambos são especificados a seguir:

Determinação dos Eventos Extremos de Precipitação

A análise dos eventos extremos de precipitação na SBHRIO foi conduzida por meio da coleta, processamento e interpretação de dados meteorológicos obtidos por satélite, com foco na identificação de episódios de chuva intensa com potencial de impacto hidrológico. O recorte temporal da análise abrangeu o período de 2003 a 2023, o que permitiu um estudo de séries históricas suficientemente longo para a identificação de tendências e padrões de ocorrência.

Para isso, foram utilizadas duas fontes principais de dados meteorológicos: o sistema MERGE (Multi-satellite Precipitation Analysis) da NASA. O MERGE forneceu dados meteorológicos e de precipitação globais. Os dados foram processados e disponibilizados, tendo sido essencialmente útil em áreas onde não existiam medições diretas de precipitação, integrando diversos satélites para determinar tais dados. Sua interface permitiu a extração de variáveis como precipitação, entre outras, para coordenadas geográficas específicas, sendo (ou o que o tornou) ideal para a análise centrada na área da SBHRIO.

Complementarmente, foi utilizada a base de dados da missão GPM, um projeto conjunto da NASA e da JAXA. O GPM forneceu dados com alta resolução espacial e temporal, derivados de sensores avançados como o Dual-frequency Precipitation Radar (DPR), o que permitiu uma estimativa precisa da intensidade e distribuição da precipitação ao redor do globo (Hou et al., 2014). Este sistema era particularmente relevante para regiões com escassez de estações meteorológicas convencionais, como era o caso de diversas áreas da bacia hidrográfica do Itajaí, especialmente em zonas de relevo acidentado.

A coleta e o processamento dos dados foram realizados por meio de scripts desenvolvidos em linguagem Python, executados na plataforma Google Colaboratory, que ofereceu infraestrutura para processamento em nuvem. Foram utilizadas bibliotecas específicas para manipulação de dados tabulares, execução de cálculos estatísticos, geração de visualizações gráficas e integração com a base MERGE.

O fluxo automatizado permitiu a extração contínua da precipitação diária na SBHRIO, utilizando uma malha de quadrículas com pontos centrais denominados "Estações Intermediárias". Os valores de chuva foram estimados via dados MERGE e refinados pelo método de interpolação IDW (Inverse Distance Weighting), garantindo precisão espacial e adequação às condições locais. Os resultados finais foram exportados em formato .xlsx, otimizando a organização e as análises estatísticas posteriores

A identificação de eventos de precipitação extrema baseou-se no método estatístico de percentis, classificando como eventos extremos os dias com precipitação superior ao percentil 95 da série histórica (Beniston et al., 2007). Essa abordagem, permitiu uma análise robusta dos eventos mais intensos, ajustada à climatologia local, e era comumente adotado em pesquisas sobre extremos hidrometeorológicos.

Determinação do Tempo de Concentração da SBHRIO

Para o cálculo do tempo de concentração (tc), utilizou-se os mapas de UOS na plataforma MapBiomas, especificamente da Coleção 8 da Série Temporal de Cobertura e Uso da Terra no Brasil, que compreendeu o intervalo de 1985 a 2024 e classificou de forma adequada o uso das áreas. Um dos principais benefícios da plataforma esteve na oferta de dados padronizados e anuais sobre diferentes tipos de uso da terra como vegetação nativa, áreas agrícolas, pastagens, zonas urbanizadas e corpos d'água, o que permitiu realizar análises detalhadas de mudanças na paisagem ao longo do tempo. O geoprocessamento dos dados ocorreu no software QGIS utilizando-se para tal, mapas dos anos 2003, 2013 e 2023.

Com base na análise dos mapas de uso e ocupação do solo, o objetivo em sequência tornou-se a análise do tempo de concentração da bacia nos marcos temporais definidos, utilizando-se de fórmulas semi-empíricas, Para isso, foi utilizado um método já consolidado para o cálculo do tempo de concentração na bacia hidrográfica, o proposto pelo Soil Conservation Service (SCS). Segundo Mata-Lima et al. (2007), o método desenvolvido pelo Soil Conservation Service (SCS) fundamenta-se nos atributos físicos da bacia hidrográfica, como área, declividade dos cursos d'água, tipo de solo e cobertura vegetal (equação 1).

$$Tc = L/(k.\sqrt{i}) \quad (1)$$

Onde:
Tc é o tempo de concentração em minutos;
L é o comprimento do canal;
k é o coeficiente relacionado ao UOS;
i é a declividade (m/m)

Os valores atribuídos a L e i foram extraídos a partir dos dados vetoriais contidos nas cartas digitais. Quanto ao parâmetro k, sua determinação foi baseada nos valores indicados no Quadro 1, apresentada adiante, partindo-se da identificação do uso e ocupação do solo e como este se associou ao tipo de cobertura caracterizado pelo WSDOT (1997) (Quadro 01).

Coeficiente k	
Tipo de UOS	**k (m/min)**
Floresta	50
Cultivo	75
Pastagem	125
Solo exposto	200
Área pavimentada	375

Quadro 01: Valores aplicados para os UOS da SBHRIO.
Fonte: Adaptado de WSDOT (1997)

Posteriormente à coleta dos dados, realizou-se o cálculo dos valores de tc para cada mapa de UOS analisado, em planilha eletrônica.

Análise de dados fluviométricos e de funcionamento das comportas da Barragem de Contenção Oeste

Os dados foram fornecidos pela Defesa Civil do Estado de Santa Catarina, órgão responsável pela operação, manutenção e monitoramento da referida barragem. Essas informações incluem registros históricos de nível de água, vazão afluente e defluente, além de registros do histórico de abertura das comportas (2000 a 2023). A escolha dessa base de dados se justifica por sua confiabilidade, cobertura temporal e espacial adequada, além da relevância institucional do órgão mantenedor no contexto da gestão de risco de desastres na região.

Os dados extremos de precipitação foram confrontados com os registros de operação da barragem, através da análise de dados das planilhas eletrônicas permitindo-se verificar a resposta do sistema de contenção, especialmente no que se refere à abertura ou fechamento das comportas durante ou após os episódios críticos.

Resultados e discussões

Neste item apresenta-se os resultados obtidos na análise dos dados de precipitação com a definição dos eventos extremos, o valor do tc e a influência deste no funcionamento da barragem de contenção.

Definição dos eventos extremos na SBHRIO

Os primeiros resultados obtidos dizem respeito à manipulação dos dados do MERGE e GPM utilizados para representar de forma consistente a variabilidade espacial da precipitação na sub-bacia hidrográfica do rio Itajaí do Oeste, aplicou-se o método de interpolação IDW (Inverse Distance Weighting). A interpolação foi realizada sobre as quadrículas previamente definidas para o recorte espacial da bacia, possibilitando a estimativa da precipitação diária em locais sem medições diretas. O processo foi automatizado por meio de um código desenvolvido em Python, que integrou os dados satelitais das plataformas MERGE e GPM e resultou na geração de 26 estações intermediárias distribuídas uniformemente ao longo da área de estudo (Figura 02).

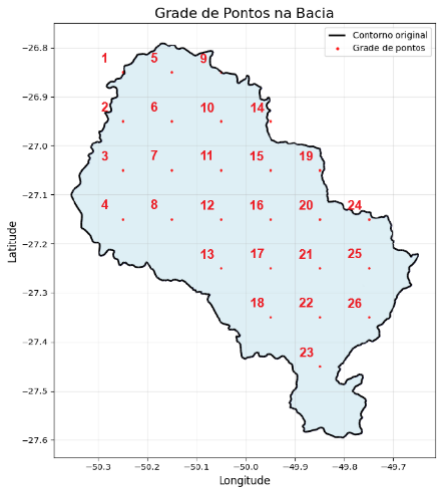


Figura 02: Localização das estações virtuais criadas.
Fonte: Elaboração própria (2025)

Com base no percentil 95 calculado para a série, foram identificados os eventos de precipitação considerados extremos (Figura 03). Essa abordagem permitiu isolar os dias com maior potencial de impacto hidrológico, ajustando o limiar de classificação às características climáticas específicas da sub-bacia. O gráfico mostra para cada data que consta no eixo das abscissas o número de estações virtuais que, naquela data, registraram evento extremo de precipitação. No eixo das ordenadas tem-se o somatório de precipitação naquela data, para o valor total de quadrículas.

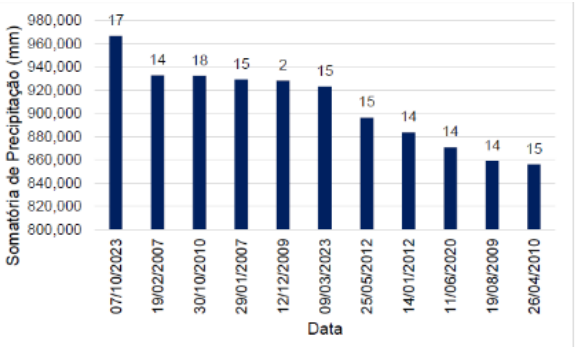


Figura 03: Gráfico das datas dos eventos extremos ocorridos na SBHRIO.
Fonte: Elaboração própria (2025)

Os eventos de precipitação acima do percentil 95 revelaram alta variabilidade temporal. O destaque absoluto ocorreu em 07/10/2023, que registrou o maior volume acumulado de aproximadamente 970,00 mm, com participação de 17 estações interpoladas. Outros episódios críticos foram observados em 19/02/2007, 30/10/2010 e 29/10/2007, com totais entre 920,00 e 950,00 mm, envolvendo de 14 a 18 estações.

Temos um destaque para o dia 12/12/2009, que obteve um acumulado superior a 960,00 mm com a participação de apenas duas estações, sendo elas as de número 24 e 25. O período entre 2007 e 2012 concentra vários eventos significativos acima do P95, sugerindo uma fase com forte influência de sistemas atmosféricos persistentes.

A análise do acumulado de dois dias revela uma alta frequência de eventos extremos com distribuição espacial uniforme, abrangendo todas as 26 estações virtuais (Figura 04). Esses episódios ocorreram de forma dispersa em 2009, 2010, 2015, 2022 e 2023, sem concentração em uma década específica. A baixa amplitude térmica entre os registros sugere que chuvas intensas e prolongadas são comuns na sub-bacia. Essa homogeneidade espacial indica que tais precipitações costumam afetar toda a bacia simultaneamente, elevando o risco hidrológico na região. Os acumulados de três dias seguem o padrão dos de dois dias, porém com maior variabilidade temporal e amplitude de valores. O evento de 22 de outubro de 2015 foi o mais expressivo da série, atingindo aproximadamente 4.200,00 mm. Outros picos significativos ocorreram em 2010, 2011, 2022 e 2023, com totais entre 3.400,00 e 4.000,00 mm. A abrangência da maioria desses eventos em 26 estações confirma o caráter fortemente regionalizado e persistente das chuvas na bacia.

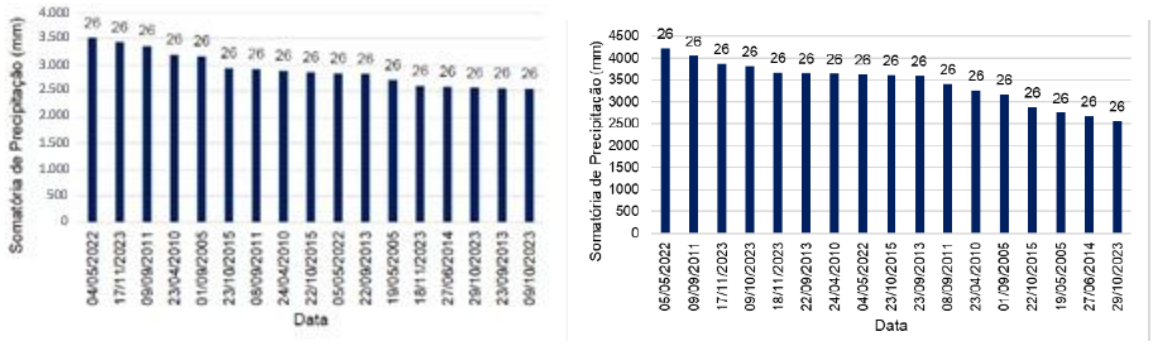


Figura 04: Gráfico das datas dos eventos extremos com precipitação acumulada de 2 dias (esq.) e 3 dias (dir.)na SBHRIO. Fonte: Elaboração própria (2025)

Determinação do tc da SBHRIO

Primeiramente foi necessário analisar-se os dados obtidos dos mapas da área de estudos obtida no MapBiomas referente aos anos de 2003, 2013 e 2023. Estes períodos foram definidos para que se pudesse averiguar em intervalos regulares possíveis alterações do UOS. A análise do UOS do solo foi realizada individualmente para cada quadrícula da malha espacial gerada pelo código de programação (Figura 02) utilizado na identificação dos eventos de precipitação em cada estação.

A análise da evolução do UOS de 2003, 2013 e 2023 indica mudanças espaciais na área de estudo, porém de caráter conservador, típico de ambiente interiorano. A formação florestal segue predominante na sub-bacia, mantendo sua distribuição geral apesar de leves reduções ao longo do período. Por outro lado, classes como pastagem, silvicultura, áreas urbanizadas e mosaicos de uso apresentaram variações. Destaca-se o aumento de 6,98% da silvicultura entre 2003 e 2023, em contraste com a redução de 9,98% das áreas agrícolas (pastagem + cultivo), resultado consistente com o observado por Preis (2019) para a Bacia do Rio Itajaí.

Em paralelo, observa-se um aumento consistente da silvicultura e do mosaico de usos, indicando intensificação das atividades produtivas e maior fragmentação do território. A área urbanizada também cresce ao longo do período, refletindo expansão antrópica. Já categorias como pastagem e outras lavouras temporárias apresentam redução, sugerindo substituição por usos mais intensivos ou diversificados. O conjunto dessas mudanças revela um processo de transformação territorial marcado pela expansão de atividades econômicas e pela diminuição relativa de áreas naturais contínuas, fatores que influenciam diretamente a dinâmica hidrológica da sub-bacia.

Objetivando-se a equação 1 para cálculo do tc, foi necessário indicar-se os valores de k contidos no método correlacionando-os com os UOS da área de estudo. A Tabela 01 mostra os valores utilizados:

Classe (MapBiomas)	Tipo de Cobertura (WSDOT, 1997)	Coeficiente k (WSDOT, 1997)
Formação Florestal	Floresta com Densa Cobertura Vegetal	50
Silvicultura	Floresta com Densa Cobertura Vegetal	50
Campo Alagado e Área Pantanosa	Floresta com Densa Cobertura Vegetal	50
Formação Campestre	Pasto Curto ou Gramado	125
Pastagem	Pasto Curto ou Gramado	125
Mosaico de Usos	Pasto Curto ou Gramado	125
Área Urbanizada	Área Pavimentada	375
Outras Áreas não Vegetadas	Área Pavimentada	375
Aquicultura	Floresta com Densa Cobertura Vegetal	50

Rio, Lago e Oceano	(nenhum)	0
Soja	Cultivo de Preparo Mínimo	75
Arroz	Cultivo de Preparo Mínimo	75
Outra	Cultivo de Preparo Mínimo	75

Tabela 01: Valores de k atribuídos para os UOS.
Fonte: Elaboração própria (2025)

Com essa associação estabelecida, os valores de uso e ocupação do solo foram quantificados para cada quadrícula da malha espacial utilizando o plugin Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) do QGIS, que forneceu o percentual de contribuição de cada classe dentro de cada unidade. Dessa forma, para cada quadrícula foi possível calcular o tempo de concentração ponderado, considerando a proporção de cada tipo de cobertura e seus respectivos coeficientes k. Após a determinação do tempo de concentração individual de todas as quadrículas, procedeu-se à soma ponderada entre elas, resultando no tempo de concentração total da sub-bacia para os anos de 2003, 2013 e 2023. Conforme dispostos na Tabela 02.

Tempo de Concentração (*tc*) na SBHRIO	2003	2013	2023
Em minutos	16.839,79	17.284,21	15.934,26
Em dias	11,69	12,00	11,07
Em semanas	1,67	1,71	1,58

Tabela 02: Valores de tc para a SBHRIO.
Fonte: Elaboração própria (2025)

A comparação entre 2003, 2013 e 2023 revela uma redução progressiva do tempo de concentração (tc), impulsionada pela expansão de áreas antrópicas e da silvicultura em detrimento das florestas nativas. Tais modificações tendem a acelerar o escoamento superficial, diminuindo o tempo necessário para que a água precipitada alcance o exutório da bacia. Assim, a tendência de queda do tempo de concentração ao longo da última década indica um aumento da suscetibilidade da bacia a respostas hidrológicas mais rápidas, o que pode intensificar o impacto de eventos extremos de precipitação e demandar maior atenção na gestão da BCO.

Análise dos dados de operação da barragem

A correlação entre os dados operacionais e pluviométricos confirma que as elevações críticas no nível da barragem coincidem com chuvas que excederam o percentil 95 (acumuladas em 2 e 3 dias) conforme identificado nos gráficos da Figura 04. Os boletins operacionais da Defesa Civil de SC mostram que nessas ocasiões ocorreram aberturas sucessivas de comportas e, em anos mais recentes, episódios de extravasamento pelo vertedouro, compatíveis com os picos de precipitação identificados nos dados interpolados das estações intermediárias.

A análise identificou um evento crítico em 17/11/2023, com altos acumulados de chuva em 2 e 3 dias. Na data, o reservatório estava em 20,14 metros. Com a elevação do nível, as operações de controle iniciaram-se em 20/11/2023, quando a marca de 23,5 metros forçou a abertura gradual de todas as sete comportas para estabilizar o sistema. O fechamento total ocorreu apenas em 23/11/2023, após o nível recuar para 21,71 metros.

Logo, apesar do *tc* da área de estudos estar em aproximadamente 11 dias, a barragem atingiu seu limite de reservação em um terço do tempo, ou seja, em 4 dias a água que escoou pela superfície da SBHRIO neste evento extremos de precipitação e chegou ao barramento. Tal fato evidencia a necessidade de implementação de novas medidas estruturantes, novas obras de contenção de cheias para a região estudada.

Quando os mapas de uso e ocupação do solo são sobrepostos espacialmente aos eventos extremos identificados, observa-se que grande parte dos acumulados mais severos se concentra sobre as quadrículas cuja cobertura do solo apresenta aumento expressivo de áreas agrícolas, pastagens e mosaicos de uso entre 2003 e 2023. Essas classes representam superfícies com maior coeficiente de escoamento e menor capacidade de infiltração, o que favorece respostas hidrológicas mais rápidas. A persistência das áreas mais impermeáveis próximas aos cursos d'água principais e secundários coincide com os setores onde os acumulados intensos produziram maior efeito sobre o nível da barragem, sugerindo uma espacialização consistente entre a dinâmica da precipitação extrema e as características antrópicas do território mapeado.

Considerações Finais

Os resultados obtidos demonstraram que a sub-bacia hidrográfica do Rio Itajaí do Oeste apresenta crescente vulnerabilidade hidrológica devido à combinação entre aumento da frequência e intensidade dos eventos extremos de precipitação e alterações no uso e ocupação do solo ao longo das últimas décadas. Os mapas de UOS revelaram ampliação expressiva das áreas antrópicas e redução de vegetação, contribuindo para maior impermeabilização. Paralelamente, o cálculo do tempo de concentração evidenciou diminuição progressiva entre 2003 e 2023, indicando resposta mais rápida da bacia aos eventos de chuva. A análise dos níveis da Barragem Oeste confirmou que precipitações acumuladas em curtos períodos como no evento de novembro de 2023 elevam rapidamente o volume a montante, exigindo manobras operacionais emergenciais. Dessa forma, os achados evidenciam uma relação direta entre as transformações territoriais e o comportamento hidrológico da barragem.

Contudo, este estudo apresenta limitações que devem ser consideradas à utilização de dados de precipitação estimados por satélite, que embora abrangentes, podem apresentar incertezas em áreas de relevo acidentado. A análise desta pesquisa não contemplou modelagem hidrodinâmica detalhada da SBHRIO, o que poderia fornecer maior precisão na avaliação do comportamento da estrutura em cenários extremos. A disponibilidade limitada de séries históricas completas de algumas variáveis hidrológicas também restringiu comparações temporalmente mais profundas, e as alterações no uso do solo foram avaliadas em três recortes temporais, o que, apesar de adequado para observar tendências, não representa todo o dinamismo anual da bacia.

Agradecimentos

Agradecemos à Defesa Civil do Estado de Santa Catarina que auxiliou na pesquisa fornecendo dados sobre a operação das barragens de contenção do Estado de Santa Catarina.

Referências Bibliográficas

BENISTON, Martin. et al. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. Climatic Change, v. 81, p. 71–95, 2007.

BORGES, Ciro Palo. Mapeamento geomorfológico de detalhe na transição entre Serra Geral e Planícies Alúvio-coluvionares no Geoparque Caminhos dos Cânions do Sul. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2025.

CARDOSO, Darlan Rubens; QUADRO, Mario Fábio Leitzke; BONETTI, Jamir. Eventos extremos de precipitação no sul do Brasil: análise histórica e tendências futuras. Revista Brasileira de Meteorologia, 2020.

DEFESA CIVIL DE SANTA CATARINA. Boletim de Alerta Hidrológico – Alto Vale do Itajaí (novembro/2023). Florianópolis: SDC, 2023. Disponível em: https://www.defesacivil.sc.gov.br/. Acesso em: 15 jun. 2025.

DUDGEON, David; ARTHINGTON, Angela H,; GESSNER, Mark O.; KAWABATA, Zen-Ichiro; KNOWLER, Duncan J; LÉVÊQUE, Christian; NAIMAN, Robert J; PRIEUR-RICHARD, Anne-Hélène, SOTO, Doris; STIASSNY, Melanie LJ; SULLIVAN, Caroline A .Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. Biological Reviews, 81 (2) 163-182, 2006.

EPAGRI/CIRAM. Relatório Técnico – Condições Hidrometeorológicas em Santa Catarina: outubro e novembro de 2023. Florianópolis: EPAGRI, 2023. Disponível em: https://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php/documentos-tecnicos/. Acesso em: 15 jun. 2025.

FARIAS, Suellen Andrade de; GONÇALVES, Tiago Batista; SANTOS, Aline Rodrigues; BATISTA, Getúlio Teixeira. Impactos do uso e cobertura da terra na disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica do semiárido baiano. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, 2021

GERBER, Dionatan et al. Caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí – Santa Catarina. Acta Biológica Catarinense, Lages, 2018.

HOU, Arthur Y.; KAKAR, Ramesh K.; NEECK, Steven; AZARBARZIN, Ardeshir A.; KUMMEROW, Christian D.; KOJIMA, Masahiro; OKI, Riko; NAKAMURA, Kenji e IGUCHI, Tohio. The Global Precipitaton Measurement Mission. American Meteorological Society Journals. v. 95. n.5 p. 701-722. mar, 2014.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Chapter 2: Changing State of the Climate System. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-2/. Acesso em: 11 jul. 2025.

MATA-LIMA, Herlander; VARGAS, Hugo, CARVALHO, Julia; GONÇALVES, Marcia; CAETENO, Hugo; MARQUES, Andreia e RAMINHOS, Cristina. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 60, n. 3, p. 525-536, jul/set, 2007.

MALMQVIST Björn, RUNDLE, Simon. Threats to the running water ecosystems of the world. Environmental Conservation 29:134–153, 2002

PETRUCCI, Eduardo e AZEVEDO, Luciana Machado de. Análise dos eventos extremos de precipitação máxima no município de Cachoeira do Sul/RS, de 1987 a 2020. Revista de Geografia (Recife), 2023.

PREIS, Christian Milanez; FRANCO, Davide e VARELA, Sophia Cavalcante. Avaliação do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Itajaí e simulação para 2027. Revista Geociências v. 40, n. 2, p. 407 - 414, 2021ALLES, Kássia. Barragem de José Boiteux atinge capacidade máxima e verte pela primeira vez na história NSC Total. Florianópolis 16/10/2023. Disponível em: <https://ocp.news/seguranca/barragem-de-jose-boiteux-e-reaberta-apos-verter-pela-primeira-vez-na-historia>. Acesso em: 9 abr. 2026.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável. Bacia Hidrográfica. Florianópolis: SIRHESC, [s.d.]. Disponível em: https://www.aguas.sc.gov.br/a-bacia-rio-itajai/bacia-hidrografica-rio-itajai. Acesso em: 2 dez. 2025.

_____. Secretaria de Estado de Proteção e Defesa Civil. Operação de Barragens. Florianópolis. Disponível em: https://www.defesacivil.sc.gov.br/operacao-de-barragens/. Acesso em: 11 abril 2026.

VIEIRA, Isabel Cristina Bohn e RIBEIRO. Eduardo Augusto Werneck. Influência do uso e ocupação do solo na qualidade da água no rio Itajaí-Açu, Santa Catarina. Revista Geografia, Recife, v. 38. n.2, p. 396-420, 2021.

WILDNER, Wilson; CAMOZZATO, Eduardo; TONIOLO, João Angelo; BINOTTO, Raquel Barros; IGLESIAS, Carlos Moacyr da Fontoura; LAUX, Jorge Henrique. Mapa geológico do estado de Santa Catarina. Porto Alegre: CPRM, 2014. Escala 1:500.000.

WSDOT, Washington State Department of Transportation. Hydraulics Manual: Directional Documents and Engineering Publications. Washington, 1997.

POTENCIAL IMPACTO DOS MODOS DE VARIABILIDADE E MUDANÇA DO CLIMA NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO SISTEMA IMUNANA-LARANJAL

1 Helenice Maria Sardinha Lemos, 2 Lúcio Silva de Sousa, 3 Francisco de Assis Dourado da Silva
1 UERJ, helenice.sardinha.lemos@gmail.com; 2 UERJ luciodesouza@gmail.com; 3 UERJ fdourado@uerj.br

Palavras-chave: Variabilidade Climática, índices climáticos, Sistema Imunana-Laranjal.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo analisar as tendências de variação no regime de chuvas nas bacias que abastecem o Sistema Imunana-Laranjal, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, no período de 1942 a 2024, considerando os possíveis impactos das mudanças climáticas e foco na variável precipitação pluviométrica. Essas tendências impactam o abastecimento urbano, especialmente nas cidades de Niterói e São Gonçalo. Os dados observados foram avaliados por meio de indicadores estatísticos clássicos. A caracterização da variabilidade e dos extremos pluviométricos foi realizada com base em índices climáticos recomendados pelo ETCCDI, incluindo PRCPTOT, RX1day, RX5day, CDD. O preenchimento de falhas foi realizado por regressão linear, adotando-se coeficientes de determinação iguais ou superiores a 0,5, critério considerado aceitável para longas séries climatológicas. Os resultados indicam um regime pluviométrico predominantemente úmido, com elevada variabilidade interanual e intensificação de eventos extremos, evidenciada pela maior concentração das chuvas em curtos intervalos de tempo. Embora não se observe redução significativa dos totais anuais de precipitação, a maior frequência e intensidade dos eventos extremos, associadas à ausência de reservatórios, ampliam a vulnerabilidade do sistema de abastecimento, reforçando a necessidade de medidas estruturais e de adaptação voltadas ao fortalecimento da segurança hídrica regional.

Introdução

A evolução no modo de vida da sociedade intensificou o crescimento demográfico no planeta, causando pressão significativa sobre a demanda de recursos naturais e alterando as condições ambientais. No século passado foi identificado que uma dessas pressões é o aumento do efeito estufa, resultando em alteração climática de forma diferenciada em distintas regiões do planeta e aumento da temperatura média do globo.(ANA, 2016)

A inter-relação entre mudanças climáticas e segurança hídrica exerce impacto direto na disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos. Alterações nos padrões de temperatura e precipitação têm resultado no aumento da frequência de eventos extremos, como secas prolongadas e enchentes, comprometendo o abastecimento urbano e a sustentabilidade dos sistemas hídricos (ANA,2016)

A segurança hídrica, portanto, ultrapassa a dimensão técnica e assume um papel estratégico no âmbito da saúde pública, da estabilidade econômica e da justiça social. A escassez hídrica, quando associada a desigualdades socioespaciais, tende a aprofundar vulnerabilidades preexistentes, evidenciando a limitação de abordagens setoriais e fragmentadas. Nesse sentido, a adoção de políticas de gestão integrada dos recursos hídricos deve ir além de diretrizes normativas, incorporando mecanismos efetivos de adaptação às incertezas climáticas e às dinâmicas territoriais (PEREIRA; RODRIGUES, 2022).

Embora o conceito de segurança hídrica pressuponha a garantia de disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas, bem como o controle de riscos associados a eventos hidrológicos extremos (ANA, 2019), sua operacionalização enfrenta entraves significativos, especialmente em contextos onde há limitações institucionais, déficits de infraestrutura e conflitos pelo uso da água. Nesse cenário, a gestão sustentável dos recursos hídricos, conforme discutido por Peixinho (2011), demanda uma abordagem verdadeiramente integrada e participativa, que reconheça as interdependências entre os sistemas naturais e as dinâmicas socioeconômicas — aspecto ainda incipientemente incorporado nas práticas de gestão no Brasil.

No que se refere à análise climática, a compreensão das tendências no regime de precipitação constitui elemento central para a avaliação da segurança hídrica, especialmente em sistemas dependentes de mananciais superficiais, como o Sistema Imunana-Laranjal. Inserida nesse contexto, a bacia Guapimirim-Macacu apresenta dinâmica hidrológica fortemente condicionada por um regime pluviométrico tropical, com marcada sazonalidade (PEREIRA; ALMEIDA; SILVA, 2017).

A bacia do rio Macacu/RJ abrange grande parte da bacia de drenagem da Baía de Guanabara, estendendo-se da serra dos Órgãos até a serra de Macaé, entre as latitudes médias de 22º 24' e 22º 57' S e longitudes médias 42º 33' e 43º 19' W (Figura 1). É limitada ao norte e noroeste pela serra dos Órgãos, à nordeste pela serra de Macaé de Cima, à leste pelas serras da Botija e de Monte Azul e ao sul pelas serras do Sambê e dos Garcias. O município de Cachoeira de Macacu tem 90% de sua área nesta bacia, Guapimirim tem aproximadamente 95% e Itaboraí, 12%. O rio Macacu nasce na serra dos Órgãos, a cerca de 1.700 m de altitude, no município de Cachoeiras de Macacu, e percorre aproximadamente 74 km até a sua junção com o Guapimirim. É uma bacia de 5ª ordem, com direção do curso d'água principal NE-SW. Suas nascentes localizam-se no município de Cachoeiras de Macacu, na serra do Mar, dentro dos limites do Parque Estadual dos Três Picos, acima da localidade conhecida como Meio da Serra. O curso d'água principal apresenta fluxo torrencial típico de regiões declivosas e ao encontrar a baixada, perde a energia e passa a meandrar. Contudo, a variabilidade interanual e a possível intensificação de extremos colocam em evidência a necessidade de análises mais robustas e espacialmente representativas. (IKEMOTO,2022).

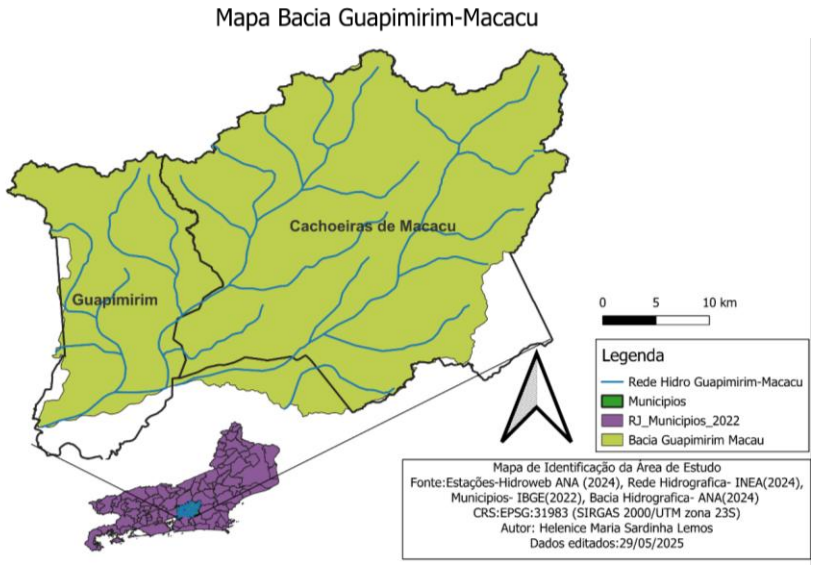


Figura 1- Mapa de identificação da Bacia Guapimirim-Macacu- RJ. Fonte: Autor (2025)

Adicionalmente, a dependência exclusiva de séries temporais pontuais, conforme destacado por Lucena (2010), restringe a capacidade de captura da complexidade climática em regiões urbanas densas. Embora evidências de aquecimento ao longo de décadas sejam consistentes, a compreensão dos processos climáticos regionais exige a integração de múltiplas abordagens metodológicas, tais como sensoriamento remoto e modelagem numérica. Entretanto, a escassez de estações meteorológicas e a descontinuidade dos dados limitam o refinamento das análises climáticas.

Dessa forma, a integração entre diferentes fontes de dados e métodos analíticos não é apenas desejável, mas necessária para reduzir incertezas e aprimorar a compreensão da variabilidade espaço-temporal da precipitação. Entretanto, é fundamental reconhecer que a incerteza é inerente aos sistemas climáticos e hidrológicos, não devendo ser utilizada como justificativa para a inação.

Os processos decisórios em contextos de incerteza exigem a incorporação do princípio da precaução, aliado à avaliação dos custos associados à não implementação de medidas adaptativas. Nesse cenário, a inação pode representar riscos significativamente superiores aos investimentos necessários para mitigação e adaptação, especialmente em sistemas de abastecimento vulneráveis às mudanças climáticas (ANA, 2016).

Materiais e métodos

Inicialmente, realizou-se a análise da cobertura pluviométrica da bacia hidrográfica Guapimirim-Macacu, por meio da coleta de dados provenientes do sistema Hidroweb (https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao), que reúne informações de estações hidrometeorológicas em todo o território brasileiro. A partir do levantamento georreferenciado da área de estudo, foram identificadas 22 estações pluviométricas, das quais apenas 10 apresentaram dados disponíveis e consistentes para análise, conforme ilustrado na Figura 2.

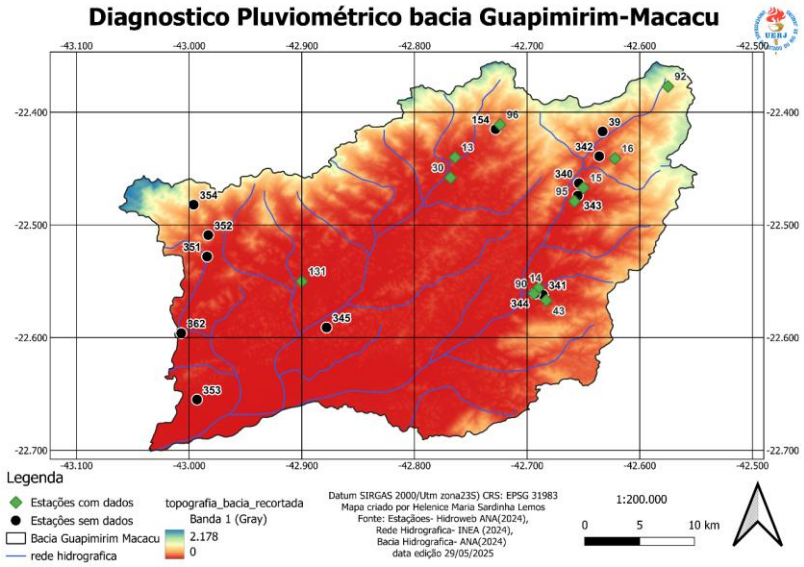


Figura 2- Diagnóstico de cobertura pluviométrica da região da Bacia de Guapimirim-Macacu. Fonte: Autor(2025)

Após essa etapa diagnóstica, os dados foram organizados em séries temporais contendo as variáveis data (escala diária) e precipitação (mm). Dentre as estações analisadas, a estação pluviométrica de código 2242014 apresenta um extenso período de dados compreendido entre 01 de julho de 1967 e 31 de dezembro de 2024, totalizando aproximadamente 57 anos e meio de registros. A taxa de falhas é muito baixa (inferior a 1%) após o ano de 1971, sendo que as falhas se concentram em blocos restritos nos primeiros anos da série, onde os campos de chuva aparecem vazios. A série apresenta alta consistência e continuidade,por esse motivo foi definida como a estação principal.

Para estender a série histórica para o período anterior a 1967, especificamente entre 1942 e junho de 1967, aplicou-se o método de regressão linear utilizando três estações secundárias (2242015, 2242090 e 2242095) que apresentaram os melhores coeficientes de determinação ($R^2 \geq 0,55$; Tabela 1) e cujos registros se iniciam na década de 1940. O preenchimento foi realizado diariamente, adotando-se como critério de aceitação $R^2 \geq 0,5$, conforme recomendado por Portuguez-Martua et al. (2022).

Dessa forma, foi possível consolidar uma série climática contínua e consistente para a estação 2242014 abrangendo o período de 1942 a 2024, com os trechos de falhas residuais preenchidos pelas estações secundárias selecionadas. Com base nessa série, calcularam-se os índices de extremos climáticos recomendados pelo ETCCDI (PRCPTOT, RX1day, RX5day, CDD), amplamente utilizados na detecção de mudanças nos padrões de precipitação.

Estações comparadas	Equação linear	R^2
2242014-2242015	y=0,67x+1,11	0,55
2242014-2242016	y=0,40x+2,12	0,25
2242014-2242013	y=0,54x+1,80	0,34
2242014-2242030	y=0,48x+3,10	0,14
2242014-2242043	y=0,58x+2,98	0,3
2242014-2242090	y=0,96x+0,38	0,82
2242014-2242092	y=0,46x+1,21	0,4
2242014-2242095	y=0,69x+1,16	0,56
2242014-2242096	y=0,49x+1,36	0,46

Tabela 1- Dados resultantes da comparação entre a estação principal e estações secundárias por regressão linear. Fonte:Autor

Resultados e Discussão

A análise da série histórica (1942–2024) evidencia um regime pluviométrico tipicamente úmido, com média anual em torno de 1.568 mm, porém com alta variabilidade interanual (desvio padrão ≈ 548 mm), indicando forte irregularidade na distribuição das chuvas ao longo dos anos, como demonstrado na Figura 3.

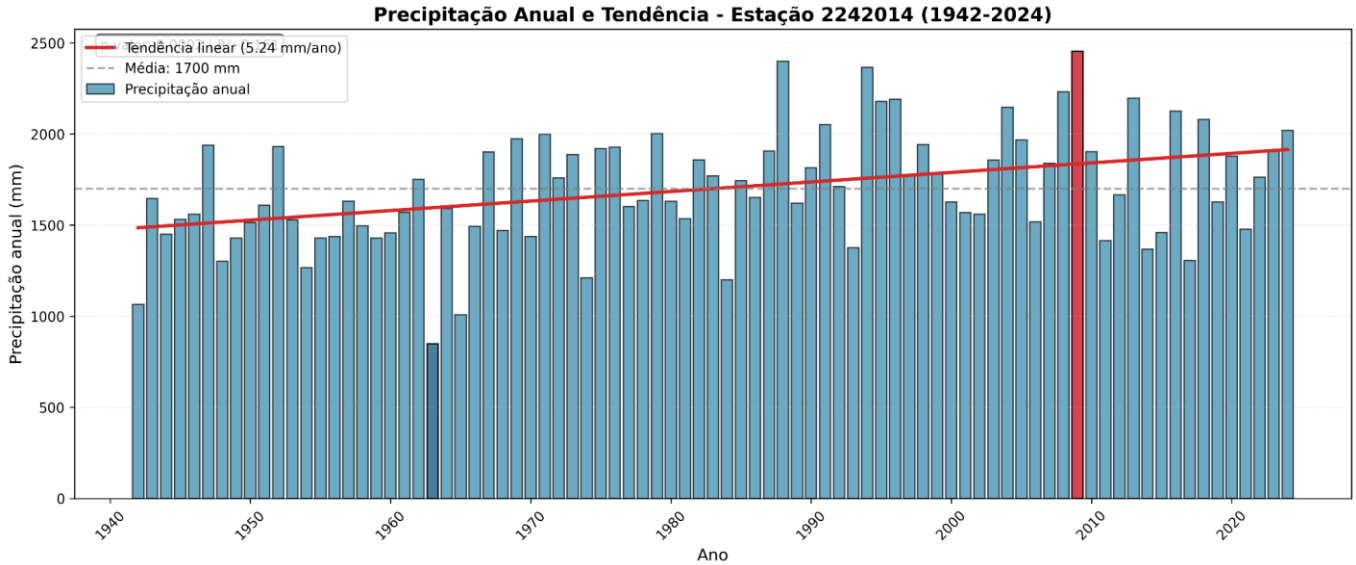


Figura 3- Gráfico de precipitação anual para o período de 1942-2024, na estação localizada no município de Cachoeiras de Macacu (RJ), Brasil, nas coordenadas geográficas 22°33'36" S e 42°41'24" W, com altitude aproximada de 27 m, referenciadas ao datum geodésico SIRGAS 2000.
Fonte: Autor (2026)

Apesar dessa variabilidade, não se observa tendência clara de modificação dos totais anuais, o que indica estabilidade no volume precipitado ao longo do tempo. No entanto, essa estabilidade quantitativa contrasta com mudanças na forma de ocorrência da precipitação, evidenciadas pelos índices de extremos.O índice RX1day(Figura 4) apresenta média anual de aproximadamente 83 mm, com eventos extremos atingindo até 168 mm em um único dia, evidenciando episódios de alta intensidade. De forma complementar, o RX5day(Figura 5) apresenta média de 157 mm, com máximos superiores a 300 mm, indicando acumulados expressivos em curtos períodos. Esses resultados demonstram que parte significativa da precipitação anual ocorre de forma concentrada, o que é reforçado pela análise dos períodos secos.

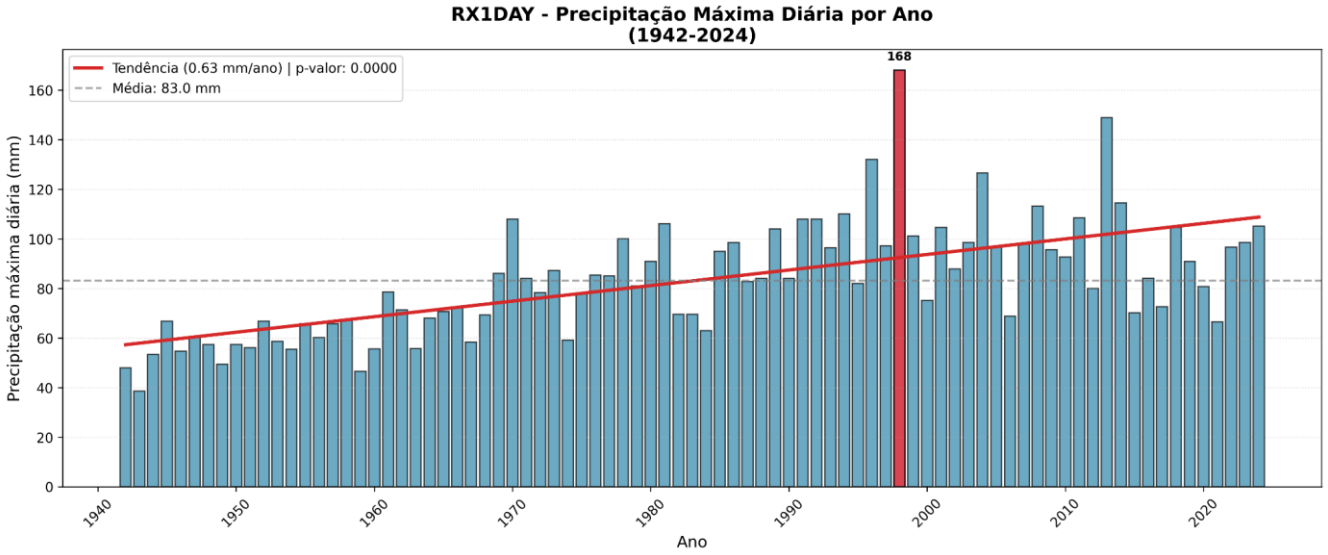


Figura 4- Índice RX1day (máxima precipitação em 1 dia) para o período de 1942–2024, na estação localizada no município de Cachoeiras de Macacu (RJ), Brasil, nas coordenadas geográficas 22°33'36" S e 42°41'24" W, com altitude aproximada de 27 m, referenciadas ao datum geodésico SIRGAS 2000.
Fonte: Autor (2026)

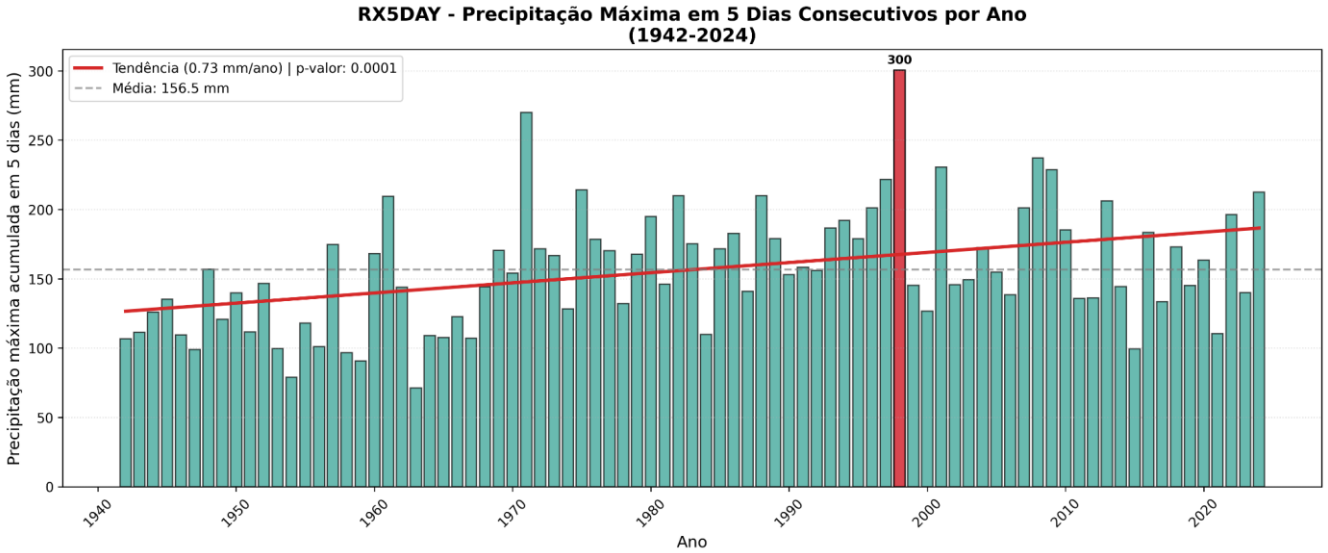


Figura 5- Índice RX5day (máxima precipitação acumulada em 5 dias consecutivos) para o período de 1942–2024, na estação localizada no município de Cachoeiras de Macacu (RJ), Brasil, nas coordenadas geográficas 22°33'36" S e 42°41'24" W, com altitude aproximada de 27 m, referenciadas ao datum geodésico SIRGAS 2000.
Fonte: Autor (2026)

Pela média mensal (Figura 6) e Boxplot (Figura 7) observa-se um padrão sazonal bem definido, com maiores valores de precipitação concentrados nos meses de verão (dezembro a março), caracterizados por medianas mais elevadas, maior amplitude interquartil e presença de valores extremos superiores, indicando eventos de chuva intensa.

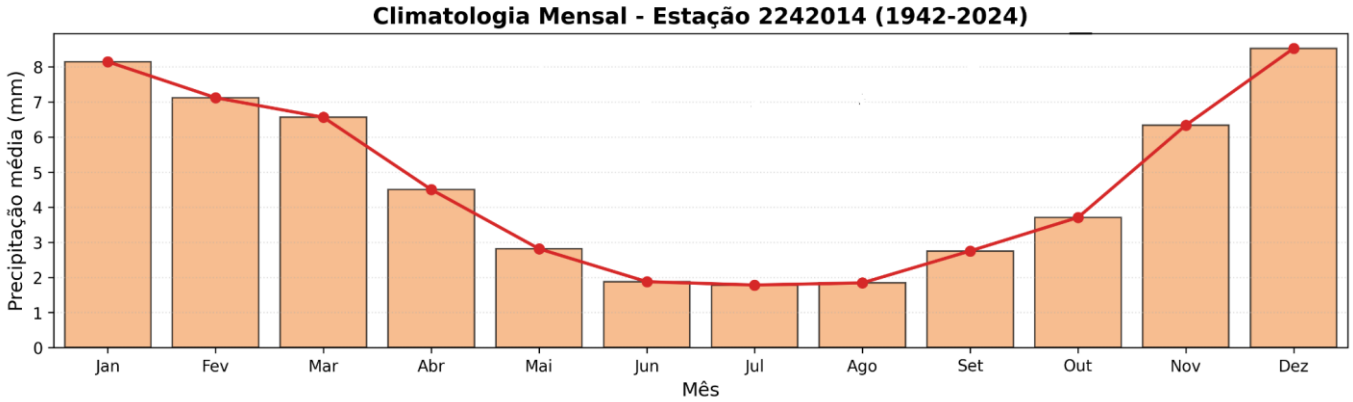


Figura 6- Gráfico de média mensal para o período de 1942-2024, na estação localizada no município de Cachoeiras de Macacu (RJ), Brasil, nas coordenadas geográficas 22°33'36" S e 42°41'24" W, com altitude aproximada de 27 m, referenciadas ao datum geodésico SIRGAS 2000.
Fonte: Autor (2026)

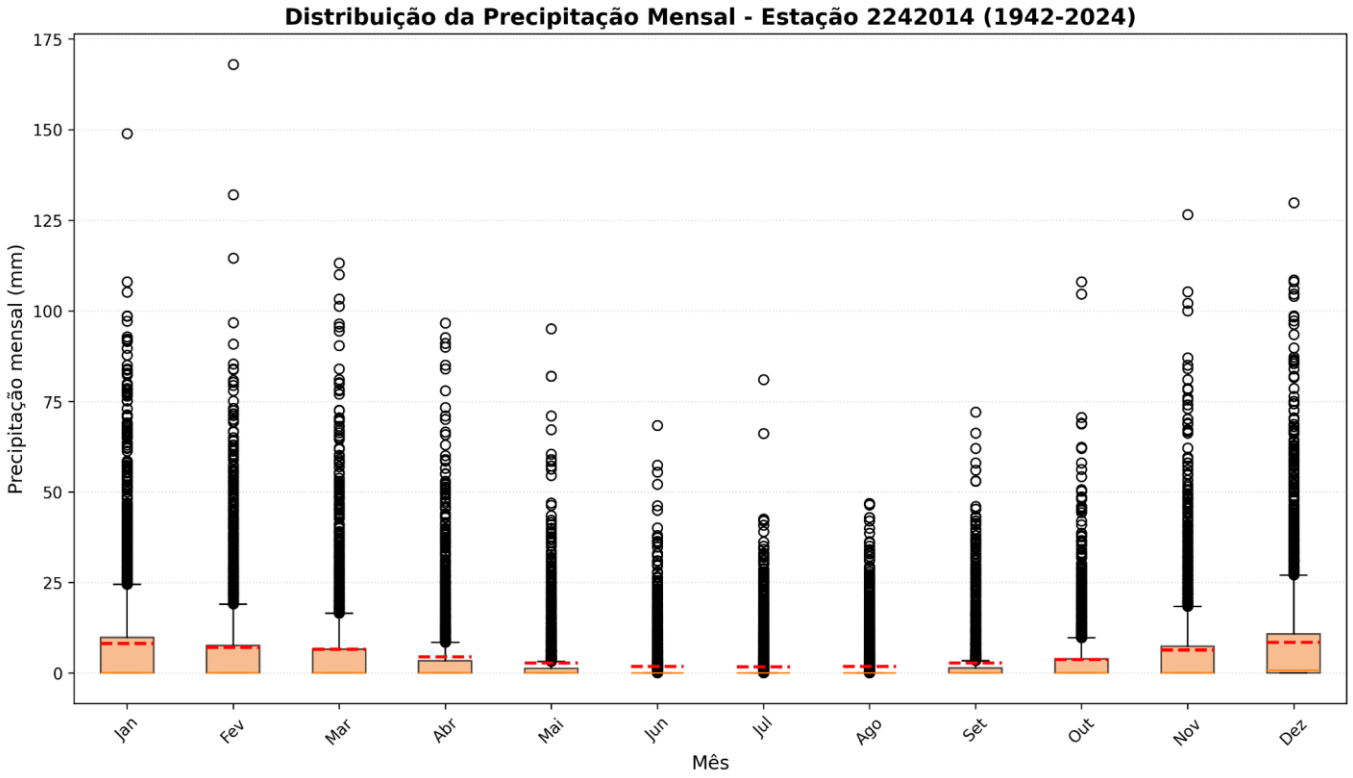


Figura 7- Gráfico Boxplot precipitação mensal para o período de 1942-2024, na estação localizada no município de Cachoeiras de Macacu (RJ), Brasil, nas coordenadas geográficas 22°33'36" S e 42°41'24" W, com altitude aproximada de 27 m, referenciadas ao datum geodésico SIRGAS 2000.
Fonte: Autor (2026)

Nos meses de outono (abril e maio), verifica-se uma redução gradual dos volumes precipitados e da variabilidade. Durante o inverno (junho a agosto), os valores são significativamente mais baixos, com medianas próximas de zero e menor dispersão, evidenciando o período mais seco do ano.

A partir da primavera (setembro a novembro), há retomada progressiva das chuvas, com aumento da variabilidade e ocorrência de outliers, sinalizando o início do período chuvoso. Esse comportamento está alinhado com o padrão climático regional e reforça a dependência do sistema hídrico do período chuvoso.

O índice CDD (dias secos consecutivos) apresenta média de aproximadamente 21 dias, podendo ultrapassar 40 dias, indicando ocorrência de períodos prolongados sem chuva, mesmo em um regime climático considerado úmido. Esse padrão — alternância entre eventos intensos e períodos secos prolongados — evidencia uma maior irregularidade intra-anual, com impactos diretos na dinâmica hídrica.

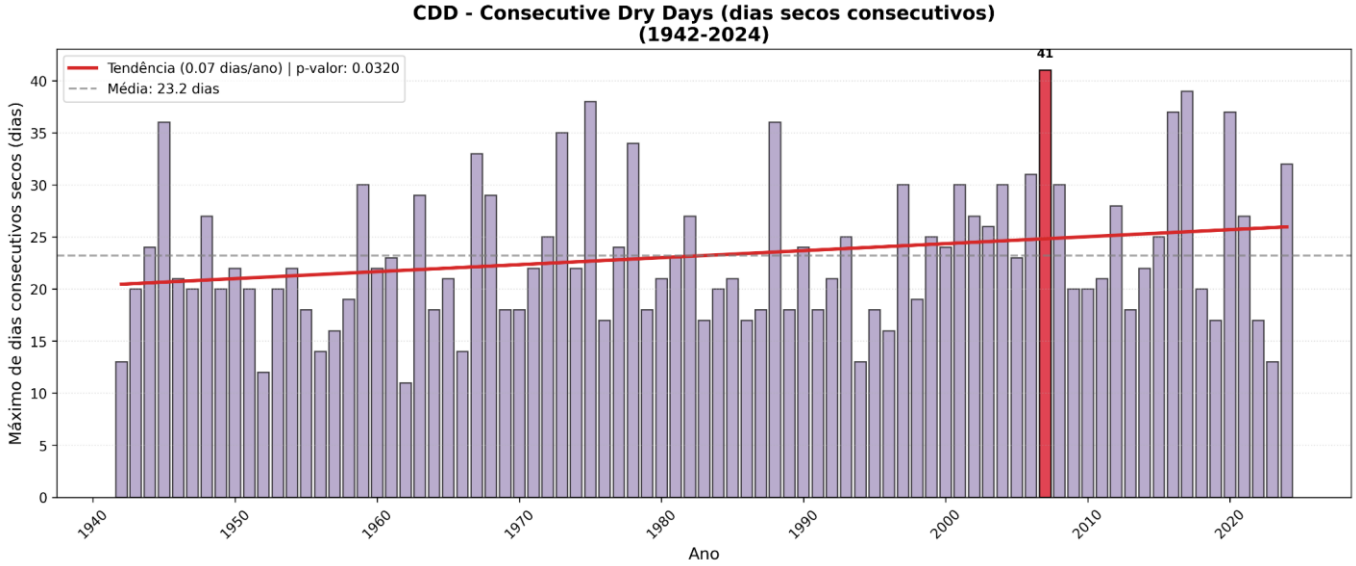


Figura 8- Índice CDD (máximo de dias consecutivos secos) para o período de 1942–2024, na estação localizada no município de Cachoeiras de Macacu (RJ), Brasil, nas coordenadas geográficas 22°33'36" S e 42°41'24" W, com altitude aproximada de 27 m, referenciadas ao datum geodésico SIRGAS 2000.
Fonte:Autor.

Mesmo sem redução do volume total precipitado, a concentração das chuvas em poucos eventos reduz a eficiência do armazenamento natural e aumenta as perdas por escoamento superficial. Esse comportamento, pode evidenciar a vulnerabilidade do sistema frente à ausência de infraestrutura adequada para reserva e armazenamento de água.

Para além da duração dos períodos secos, a análise do número anual de dias com chuva (Figura 8) revela um aspecto complementar e igualmente relevante: embora o volume total precipitado não apresente redução significativa ao longo da série histórica, observa-se uma tendência de concentração da chuva em menos dias por ano. Entre 1940 e 2023, o número médio anual de dias com precipitação superior a 0,1 mm foi de aproximadamente 140 dias, com oscilações interanuais que atingem mínimos próximos a 110 dias e máximos em torno de 165 dias. Essa redução na frequência dos eventos chuvosos, associada à manutenção ou mesmo ao aumento da intensidade dos extremos (RX1day e RX5day), indica que a mesma quantidade anual de precipitação vem ocorrendo de forma mais concentrada e torrencial. Tal comportamento reduz a eficiência da infiltração e do recarga de aquíferos, ao mesmo tempo em que amplia o escoamento superficial e os riscos de alagamentos e enchentes nos trechos de baixada da bacia do Guapimirim-Macacu.

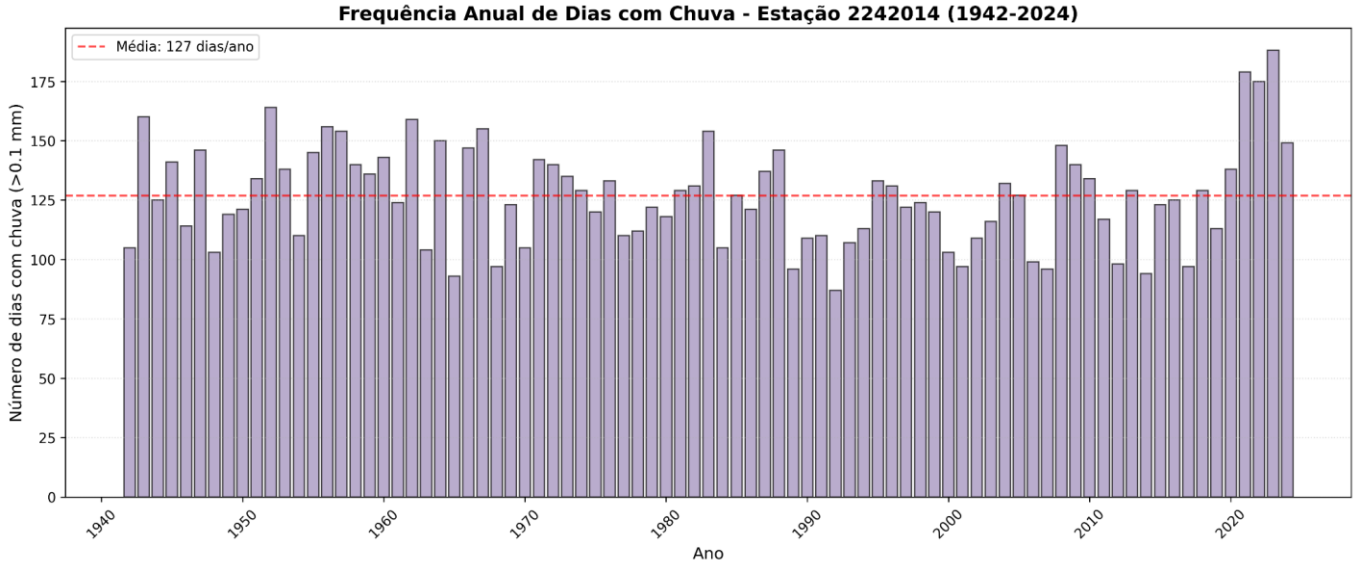


Figura 9 – Número anual de dias com chuva (>0,1 mm) para o período de 1940–2023, na estação localizada no município de Cachoeiras de Macacu (RJ), Brasil, nas coordenadas geográficas 22°33'36" S e 42°41'24" W, com altitude aproximada de 27 m, referenciadas ao datum geodésico SIRGAS 2000.
Fonte: Autor (2026)

A variabilidade interanual e a concentração dos eventos extremos tornam-se ainda mais evidentes quando se examina a série temporal mensal da precipitação (Figura 9). A média móvel de 12 meses suaviza as oscilações sazonais e permite identificar ciclos de aproximadamente 4 a 6 anos de maior ou menor pluviosidade, possivelmente associados a fenômenos de grande escala, como El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e a Dipolo do Atlântico. Observa-se que períodos como o início da década de 1970, meados dos anos 1980 e o triênio 2012–2014 apresentaram totais pluviométricos sistematicamente abaixo da média histórica, enquanto os anos de 1966–1967, 1996–1997 e 2020–2021 registraram máximos expressivos. Essa alternância entre fases úmidas e secas, sobreposta à tendência de estabilidade do total anual, impõe grande desafio à gestão de recursos hídricos em sistemas sem reservação significativa, como é o caso do Sistema Imunana-Laranjal. A ausência de barramentos ou de reservatórios de regularização torna o abastecimento diretamente dependente da precipitação ocorrida nos dias ou semanas imediatamente anteriores, ampliando a vulnerabilidade a veranicos e a estiagens prolongadas.

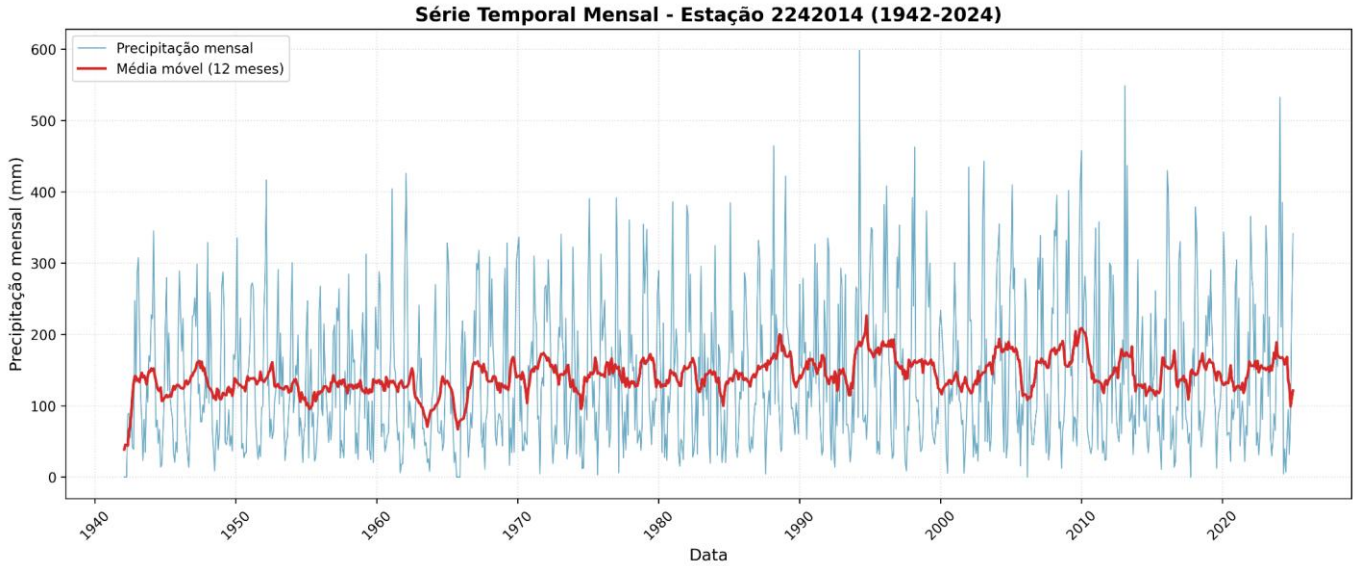


Figura 10 – Série temporal mensal da precipitação (mm) e média móvel de 12 meses para o período de 1942–2024, na estação localizada no município de Cachoeiras de Macacu (RJ), Brasil, nas coordenadas geográficas 22°33'36" S e 42°41'24" W, com altitude aproximada de 27 m, referenciadas ao datum geodésico SIRGAS 2000.
Fonte: Autor (2026)

Em síntese, os resultados indicam que a segurança hídrica do Sistema Imunana-Laranjal está ameaçada não por uma redução inequívoca da precipitação total anual, mas por uma reorganização do regime pluviométrico caracterizada por: (i) maior intensidade dos eventos extremos (RX1day e RX5day); (ii) redução do número de dias com chuva; (iii) alternância de ciclos plurianuais secos e úmidos; e (iv) manutenção de períodos secos consecutivos (CDD) que podem ultrapassar 40 dias. Esse conjunto de transformações aponta para a necessidade de adoção de medidas estruturais (como pequenas barragens de regularização ou sistemas de aproveitamento de águas pluviais) e não estruturais (como sistemas de alerta hidrológico e gestão integrada da demanda), de modo a aumentar a resiliência do sistema frente às incertezas climáticas futuras.

Considerações Finais

Conclui-se que o regime pluviométrico da Bacia Guapimirim-Macacu, no período de 1942 a 2024, não apresentou redução significativa do volume total anual de precipitação, que se manteve em torno de 1.568 mm, porém com elevada variabilidade interanual (desvio padrão de 548 mm), indicando que a segurança hídrica do Sistema Imunana-Laranjal está ameaçada não pela escassez quantitativa da chuva, mas por uma profunda reorganização do seu padrão de ocorrência.

Adicionalmente, os índices de extremos climáticos (ETCCDI) revelaram transformações expressivas: o RX1day atingiu máximos de 168 mm em um único dia e o RX5day superou 300 mm em cinco dias consecutivos, enquanto o número anual de dias com chuva apresentou tendência de redução, aproximando-se de 110 dias em alguns anos, o que significa que o mesmo volume pluviométrico está cada vez mais concentrado em poucos eventos torrenciais.

Observa-se ainda que o índice CDD registrou média de 21 dias consecutivos sem chuva, podendo ultrapassar 40 dias, evidenciando a ocorrência de veranicos prolongados mesmo em um regime climaticamente úmido, e que a média móvel de 12 meses identificou ciclos plurianuais de 4 a 6 anos, com períodos críticos abaixo da média histórica nas décadas de 1970, meados de 1980 e no triênio 2012-2014, o que impõe grande desafio à gestão de recursos hídricos em sistemas sem reservação significativa.

Nesse contexto, o impacto direto sobre o Sistema Imunana-Laranjal é preocupante: a concentração das chuvas em poucos eventos extremos reduz a infiltração e a recarga dos aquíferos, amplia o escoamento superficial e os riscos de alagamentos nas áreas de baixada, enquanto os longos períodos secos consecutivos aumentam a demanda sobre a captação em momentos de menor disponibilidade hídrica, vulnerabilidade esta agravada pela ausência de reservatórios de regularização no sistema.

Diante desse cenário, fazem-se necessárias medidas estruturais, como o estudo de viabilidade de pequenas barragens de regularização ou sistemas de aproveitamento de águas pluviais, medidas não estruturais, como a implementação de sistemas de alerta hidrológico com base em previsões sazonais e a gestão integrada da demanda, além do aprofundamento científico da correlação entre os índices de precipitação e os modos de variabilidade climática (ENOS, Dipolo do Atlântico) para aprimorar a previsibilidade de ciclos secos e úmidos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) através do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2023. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProÁgua apoio técnico científico aportado até o momento.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Brasília, DF: ANA, 2019. 112 p. ISBN 978-85-8210-059-2. Disponível em: https://www.ana.gov.br. Acesso em: 15 maio 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação* / Agência Nacional de Águas. – Brasília: ANA, GGES, 2016 93 p. : il. ISBN: 978-85-8210-033-2
CLIMATE HAZARDS CENTER. *CHIRPS Version 2.0: Daily Global Precipitation Data (1981–present)*. Santa Barbara: University of California, 2026. Disponível em: https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/. Acesso em: 20 abr. 2026.

IKEMOTO, S. M.; JOHNSSON, R. M. F. Iniciativas para proteção de mananciais de abastecimento público: estudo de caso da bacia do rio Guapi-Macacu, RJ. In: CONGRESSO DA ABRHIDR, 60., 2022, [S.l.]. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/60/PAP023055.pdf. Acesso em: 29 maio 2025.

LUCENA, A. F. de. Análise do clima urbano da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. 2010. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

PEIXINHO, F. C. Gestão sustentável dos recursos hídricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16.; ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 17., 2011, [S.l.]. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011.

PEREIRA, V. C. R.; ALMEIDA, C. N.; SILVA, T. M. Diagnóstico hidrogeoquímico na Bacia do Guapimirim-Macacu (RJ). **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 40, n. 3, p. 82-93, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2017_3_82_93. Disponível em: http://dx.doi.org/10.11137/2017_3_82_93. Acesso em: 22 maio 2025.

PEREIRA, V. R.; RODRIGUES, D. A. Vulnerabilidades da segurança hídrica no Brasil frente às mudanças climáticas. **Derbyana**, São Paulo, v. 43, e777, 2022. Disponível em: https://revistaig.emnuvens.com.br/derbyana/article/view/777/764. Acesso em: 10 out. 2024.

PORTUGUEZ-MAURTUA, M.; ARUMÍ, J. L.; LAGOS, O.; STEHR, A.; MONTALVO ARQUIÑIGO, N. Filling gaps in daily precipitation series using regression and machine learning in inter-Andean watersheds. **Water**, Basel, v. 14, n. 11, art. 1799, 2022. DOI: 10.3390/w14111799. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/14/11/1799. Acesso em: 21 jan. 2026.

TÓRNIO, C. A. A.; KEDE, M. L. F. M.; SOUZA, L. S. de. Avaliação do desempenho das estimativas de precipitação do produto CHIRPS para os municípios de São Gonçalo e Niterói (RJ). **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, MS, v. 34, p. 79-103, jan./jun. 2024. ISSN 2237-8642. Disponível em: https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps. Acesso em: 15 maio 2025.

RESILIÊNCIA CLIMÁTICA EM PROJETOS DE REMEDIAÇÃO AMBIENTAL: SOLUÇÃO RESILIENTE ÀS CHEIAS EXTREMAS DE 2024 PARA SOLOS CONTAMINADOS POR METAIS

Marcos Sillos, M.ª Graça Brito, Alexandra Suhogusoff, Paula F. da Silva, Livia de Almeirda Freitas, Fernanda Souto Barreto, Luiz Carlos Ferrari

NOVA FCT & TEKS REMEDIAR, marcos@edutechambiental.com.br; NOVA FCT & GeoBioTec, mgb@fct.unl.pt; CEPAS/Instituto de Geociências USP, suhogusoff@usp.br, NOVA FCT & GeoBioTec, apfs@fct.unl.pt, CEPAS/Instituto de Geociências USP, livia.almeidafr@usp.br, CEPAS/Instituto de Geociências USP, fernandasouto@usp.br, CEPAS/Instituto de Geociências USP, luizferrari@usp.br,

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Projetos geoambientais; Remediação resiliente e sustentável.

Resumo

Os projetos de engenharia ambiental enfrentam desafios sem precedentes devido às mudanças climáticas, que aumentam a frequência e a intensidade de fenômenos meteorológicos extremos, como cheias severas. Estes cenários ameaçam a estabilidade e a eficácia das soluções ambientais tradicionais, tornando premente a adoção de medidas resilientes para garantir-se a robustez de projetos contemporâneos. Este estudo de caso apresenta uma área industrial desativada contaminada *(brownfield)* no município de Canoas (Rio Grande do Sul, Brasil), uma região severamente impactada pelas cheias extremas de 2024. Fortuitamente, antes do desastre ambiental, o processo decisório de escolha da técnica a tratar a área pautou-se, entre outros quesitos, pela sustentabilidade e resiliência às mudanças climáticas, optando-se pelo tratamento *on-site* do solo impactado. O processo adotado, conhecido como hidrociclonagem, permitiu separar um extrato intensamente contaminado por metais e por metaloide, destacando-se arsênio, cádmio e chumbo. A solução tecnológica não só alcançou uma elevada eficiência operacional, recuperando aproximadamente 93% do solo tratado (3019 m³) para reutilização segura e concentrando os resíduos perigosos em um volume mínimo de 6% (200 m³), como também, de forma crucial, provou ser estrutural e funcionalmente resiliente durante os eventos posteriores de cheia extrema. Ao remover e isolar proativamente os contaminantes, antes que as águas atingissem a área de interesse, a remediação evitou a dispersão de sedimentos de elevado grau de risco toxicológico para a saúde humana e para o meio ambiente na envolvente do sítio tratado, protegendo de forma eficaz as comunidades vulneráveis e os ecossistemas circundantes. Conclui-se que a adaptação de projetos ambientais para incorporar tecnologias resilientes faz-se essencial para garantir a sustentabilidade a longo prazo, mitigar os riscos ecotoxicológicos e manter o sucesso operacional sob forte pressão climática.

Introdução

As mudanças climáticas representam, na atualidade, um dos maiores desafios para a elaboração e execução de projetos de engenharia ambiental (IPCC, 2023). A crescente frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como as cheias severas, colocam à prova a estabilidade de infraestruturas e a eficácia de soluções ambientais tradicionais. Nesse cenário de incertezas, a resiliência climática deixou de ser apenas um conceito teórico para se tornar um requisito normativo e operacional indispensável, especialmente em áreas urbanas e industriais vulneráveis (Sillos *et al.*, 2025a).

O impacto destas mudanças é particularmente crítico na gestão de áreas contaminadas, conhecidas como *brownfields* (espaços industriais abandonados ou subutilizados), como destacado em Sillos *et al.* (2025b). A contaminação do solo por metais pesados e metaloides, com destaque para o arsênio (As), o chumbo (Pb) e o cádmio (Cd), decorrente de atividades industriais pretéritas, já configura um passivo ambiental grave devido à elevada toxicidade, potencial carcinogênico e persistência destes elementos no ecossistema (Jez e Lestan, 2016). Em condições normais, estes contaminantes podem permanecer relativamente imóveis nas matrizes do solo, no entanto, quando estas áreas estão localizadas em zonas suscetíveis a cheias, o risco altera-se drasticamente. A saturação prolongada do solo pela elevação do nível da água altera as condições de oxirredução (potencial redox) e o pH do meio, o que pode aumentar exponencialmente a mobilidade e a biodisponibilidade dos metais (para essa avaliação é importante analisar o diagrama de Pourbaix de cada elemento no meio em estudo). Esta dinâmica físico-química promove a lixiviação e a rápida dispersão dos contaminantes para os lençóis freáticos, corpos hídricos superficiais e, inevitavelmente, para as áreas residenciais adjacentes arrastadas pelas correntes das cheias, resultando em desastres ecotoxicológicos de grandes proporções e na contaminação generalizada da cadeia trófica (Sillos, 2025).

Diante desta dinâmica, as estratégias de remediação convencionais muitas vezes demonstram-se insuficientes por não considerarem o fator de estresse climático extremo no seu dimensionamento, sendo esse um contexto em que a remediação sustentável e resiliente ganha destaque. A lavagem de solos (*soil washing*) baseada na tecnologia de hidrociclonagem surge como uma alternativa de elevada eficiência em projetos ambientais, atuando na separação física das partículas do solo, concentrando as substâncias químicas de interesse (SQI) na fração mais fina e, por fim, permitindo a recuperação da maior parte do solo para reutilização segura (Sarma *et al.*, 2024). Para além da eficiência técnica, a rapidez de processamento e a capacidade de isolar o contaminante antes de eventos críticos conferem a esta técnica um caráter de elevada resiliência.

O estado do Rio Grande do Sul, Brasil, vivenciou entre abril e maio de 2024 um desastre climático caracterizado por inundações extremas que submergiram diversas cidades, incluindo o município de Canoas. A ocorrência das enchentes transformou esta área do estudo de caso em um verdadeiro laboratório em escala real para testar a resiliência de projetos ambientais face aos cenários de catástrofe.

Sendo assim, o presente estudo tem como objetivo apresentar e avaliar o caso prático da aplicação de um projeto de remediação com características de resiliência e robustez frente às mudanças climáticas. Ao documentar este caso, espera-se fornecer subsídios técnicos que reforcem a necessidade de integrar a adaptação dessa perspectiva climática aos projetos de engenharia ambiental futuros.

Fundamentação Teórica

Dinâmica de Contaminantes Metálicos em Cenários de Cheia

A presença de metais e metaloides em *brownfields* é uma preocupação global de longa data. Elementos como arsênio, chumbo e cádmio caracterizam-se pela sua elevada toxicidade e não biodegradabilidade. Em condições ambientais estáveis, estes metais tendem a permanecer adsorvidos às partículas finas do solo (argilas e siltes) ou precipitados na forma de compostos insolúveis, apresentando mobilidade restrita (Jez e Lestan, 2016). No entanto, o advento de fenómenos climáticos extremos, nomeadamente cheias prolongadas, altera drasticamente a físico-química do ambiente pedológico.

A saturação do solo pela água induz uma rápida transição de condições aeróbias para anaeróbias, resultando em uma queda acentuada do potencial de oxirredução (Eh) e em variações de pH. Este ambiente, avaliado pelo diagrama de Pourbaix, pode promover a dissolução de óxidos de ferro e manganês que, frequentemente, atuam como matrizes de retenção para diversos SQIs. Com a liberação destes elementos tóxicos para a fase aquosa (Libera *et al.*, 2019), podem ser carreados dissolvidos ou suspensos na coluna de água da enchente, adquirindo elevada mobilidade, e sendo facilmente transportados para lençóis freáticos, rios e áreas urbanas, ampliando a escala espacial do passivo ambiental e o risco de exposição humana.

Princípios da Hidrociclonagem

Para mitigar os riscos associados à mobilização de contaminantes, as tecnologias de remediação devem ser focadas na remoção definitiva ou no isolamento extremo da carga poluidora. A lavagem de solos *(soil washing)* emerge como uma solução mecânica de elevada robustez (Sillos *et al*., 2025a). O princípio fundamental baseia-se no fato de que a grande maioria dos contaminantes metálicos se concentra nas frações granulométricas mais finas do solo, devido à sua maior superfície específica e capacidade de troca catiônica (CTC), (Dermont *et al.*, 2008).

A hidrociclonagem otimiza este processo de separação por meio da aplicação de forças centrífugas em um equipamento de geometria cônica. A mistura de solo e água é injetada tangencialmente sob pressão elevada no hidrociclone, gerando um vórtice descendente. As partículas mais grossas e densas (areias), que geralmente se encontram limpas, são empurradas para as paredes do cone e descarregadas na base *(underflow)*. Simultaneamente, um vórtice ascendente interior arrasta as partículas finas e leves contaminadas (argilas e siltes), juntamente com a maior parte da água, para a saída superior (overflow). Esta separação granulométrica permite reduzir o volume de material perigoso de forma exponencial, viabilizando econômica e ambientalmente a gestão do passivo (Sarma *et al.*, 2024).

Material e Métodos

Caracterização da Área de Estudo e Suscetibilidade a Cheias

A área de estudo localiza-se na região central do município de Canoas, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, inserida na Região Metropolitana de Porto Alegre. O local encontra-se em uma planície fluvial, caracterizada por relevo predominantemente plano a suavemente ondulado, e é delimitado por corpos hídricos importantes, como os Rios Jacuí e dos Sinos. A baixa elevação média da área (aproximadamente 10 m) contribui para um alto grau de vulnerabilidade a cheias (Wildner *et al.*, 2008).

A área total de intervenção compreende 11.300 m² e está inserida em um complexo industrial com mais de 80 anos de operação. O histórico de uso do solo, voltado para a fabricação de embalagens de vidro, resultou na formação de um aterro irregular de resíduos industriais, com elevadas concentrações de arsênio (As), crômio (Cr), óleo de baixo ponto de fluidez (BPF) e vidro (Sillos, 2025).

A suscetibilidade a eventos perigosos climáticos da região foi tragicamente confirmada entre abril e maio de 2024, quando o Rio Grande do Sul enfrentou um desastre climático (Figura 01). Volumes acumulados de precipitação atingiram 520 mm em apenas um mês, superando drasticamente a capacidade de drenagem natural e urbana, o que resultou no colapso dos sistemas de defesa e na inundação completa da área de estudo, com níveis de água superiores a 1,5 m.

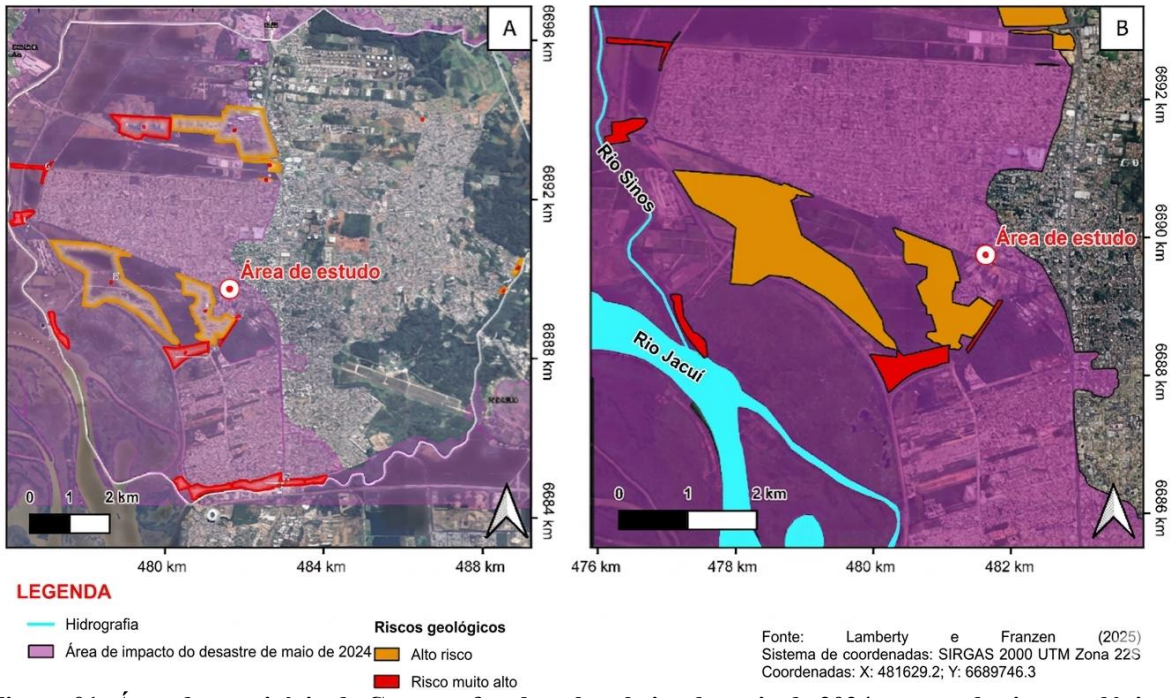


Figura 01: Área do município de Canoas afetada pelas cheias de maio de 2024 e mapa de risco geológico. Fonte: Lamberty e Franzen (2025).

Seleção da Tecnologia de Remediação

O plano de intervenção foi desenvolvido com base nas normas técnicas brasileiras (ABNT) e priorizou a adoção de estratégias de remediação sustentáveis. Considerando as elevadas concentrações de metais no solo e o risco climático de cheias futuras, a escolha da tecnologia considerou, não apenas a eficácia técnica, mas também a resiliência a longo prazo.

Foi realizada uma análise comparativa entre diversas técnicas convencionais, incluindo atenuação natural, biorremediação, escavação e encapsulamento. A lavagem de solos *(soil washing)* foi selecionada como a estratégia mais adequada, destacando-se pela sua capacidade de separar fisicamente os contaminantes, reduzir drasticamente o volume de resíduos perigosos a serem destinados à aterro classificado e permitir a reutilização segura da maior parte do solo tratado no próprio local (*on-site*). Ao contrário de abordagens como o encapsulamento em argila, que poderiam falhar estruturalmente sob cheias severas e correntes de água, a lavagem de solo ofereceu uma solução definitiva de remoção, garantindo resiliência face a futuros eventos climáticos extremos.

Sistema de Lavagem de Solos por Hidrociclonagem

O sistema de lavagem de solos por hidrociclonagem (Figura 02) consiste em uma técnica de remediação *on-site* que, como referido, utiliza forças centrífugas e gravitacionais para separar partículas finas (argilas e siltes) das frações mais grossas (areias e cascalhos). Como os contaminantes tendem a adsorver-se mais fortemente nas partículas mais finas, devido à maior CTC destas frações, o processo permite concentrar a carga poluidora em um volume reduzido (Xu *et al.*, 2024).

O processo implementado na área de estudo compreendeu quatro etapas principais (Figura 02): (1) dupla hidrociclonagem para separação granulométrica sucessiva das frações finas; (2) adição de coagulante químico num tanque cônico para promover a agregação dos contaminantes em flocos; (3) sedimentação gravítica da mistura coagulada; e (4) circuito fechado para a recirculação da água clarificada. Simultaneamente, o lodo resultante, contendo os contaminantes concentrados, foi encaminhado para sacos de desidratação geotêxtil *(geobags)* para secagem e posterior deposição controlada em um aterro industrial licenciado para resíduos perigosos.

A intervenção tratou um volume de aproximadamente 3019 m³ de solo contaminado. Para assegurar a sustentabilidade hídrica da operação, o sistema operou com reutilização de água, utilizando cerca de 900 m³ no total, dos quais 90% foram provenientes do aproveitamento de águas pluviais.

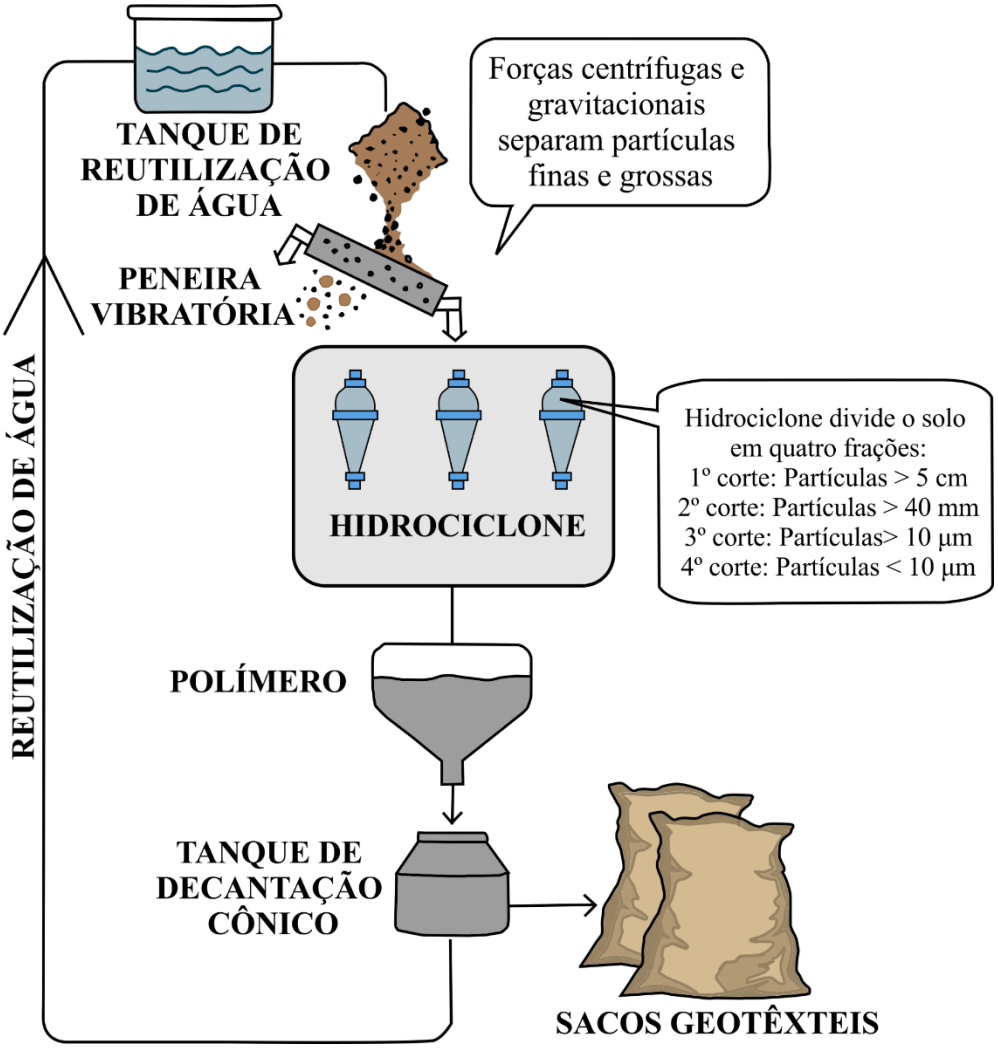


Figura 02: Representação esquemática das principais etapas do processo de lavagem de solos utilizando hidrociclonagem. Fonte: Adaptado de Sillos (2025).

Para validar a eficácia do tratamento e o cumprimento das normativas ambientais, foi estabelecido um rigoroso protocolo de amostragem e análise química. As amostras de solo bruto, das frações recuperadas (areias) e do lodo residual foram recolhidas em triplicado e submetidas à digestão ácida, de acordo com as metodologias padronizadas internacionalmente. A quantificação das concentrações de metais pesados (As, Cd e Pb) foi realizada através de Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). Os resultados analíticos foram posteriormente cruzados com os Valores Orientadores para Solo estabelecidos pela Resolução CONAMA n.º 420/2009, adotando-se o limite de Intervenção para Cenário Industrial como métrica de sucesso para a reabilitação da área.

Resultados e Discussão

Eficácia da Hidrociclonagem na Contenção da Contaminação

A aplicação da técnica de lavagem de solos por hidrociclonagem permitiu o tratamento efetivo de um volume total de 3019 m³ de solo contaminado. O processo operou em três etapas principais de separação granulométrica (Figura 03). Na primeira etapa (1.º corte), recuperaram-se aproximadamente 724 m³ de material composto por cerca de 95% de vidro, que foi encaminhado para reciclagem. O segundo corte, correspondente à fração de areia grossa, gerou 1660 m³ de material, enquanto o terceiro corte, referente à areia fina, resultou em 453 m³. A etapa de concentração de contaminantes produziu apenas cerca de 181 m³ de lodo (fração fina), que foi classificado como resíduo perigoso, condicionado em *geobags* (sacos de desidratação em geotêxtil) e transportado para um aterro industrial licenciado. Para quantificar a eficiência do processo, a Tabela 01 apresenta as concentrações dos principais metais identificados no solo bruto (antes do tratamento) e a sua drástica redução nas frações recuperadas (areia grossa e fina), evidenciando o atendimento aos limites legais para uso industrial.

Parâmetro	Unidade	Areia grossa		Areia Fina		GEOBAG 1	GEOBAG 2	CONAMA 420
		Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2	CMA
Antimônio	$mg \cdot kg^{-1}$	<1	<1	<1	<1	78	65	10
Arsênico	$mg \cdot kg^{-1}$	<1	<1	5	7	356	435	55
Bário	$mg \cdot kg^{-1}$	42	14	16	26	309	350	500
Cádmio	$mg \cdot kg^{-1}$	3	5	6	6	63	73	8
Chumbo	$mg \cdot kg^{-1}$	46	58	133	160	2270	2460	300
Cobalto	$mg \cdot kg^{-1}$	1	<1	<1	2	103	89	65
Estanho	$mg \cdot kg^{-1}$	13	20	20	34	450	520	400
Cromo	$mg \cdot kg^{-1}$	123	104	88	72	131	128	300
Crômio VI	$mg \cdot kg^{-1}$	<1	<1	<1	<1	131	645	-
Molibdênio	$mg \cdot kg^{-1}$	5	4	4	3	4	4	100
Níquel	$mg \cdot kg^{-1}$	32	26	24	24	55	63	100
Prata	$mg \cdot kg^{-1}$	6	<1	<1	<1	109	116	50
Selênio	$mg \cdot kg^{-1}$	<1	<1	<1	<1	32	17	-
Zinco	$mg \cdot kg^{-1}$	114	112	30	50	770	844	1 000

Tabela 01: Concentração de metais antes e após a hidrociclonagem.
Fonte: Sillos (2025).

As análises químicas confirmaram a alteração de qualidade ambiental inicial, na qual o solo bruto apresentou concentrações de arsénio (230 mg/kg), cádmio (17,1 mg/kg), chumbo (461 mg/kg) e antimónio (43 mg/kg). Estes valores ultrapassam os limites de intervenção para uso industrial estabelecidos pela legislação brasileira (Resolução CONAMA n.º 420/2009). Após o tratamento, observou-se uma diminuição drástica nas frações recicláveis, tanto na areia grossa como fina, as concentrações de metais ficaram abaixo dos limites legais, comprovando a eficácia da hidrociclonagem na viabilização da reutilização destes materiais. Já a fração residual, retida nos *geobags*, apresentou concentrações elevadas, justificando a sua classificação como resíduo perigoso, sendo a seguir destinada a aterro classificado.

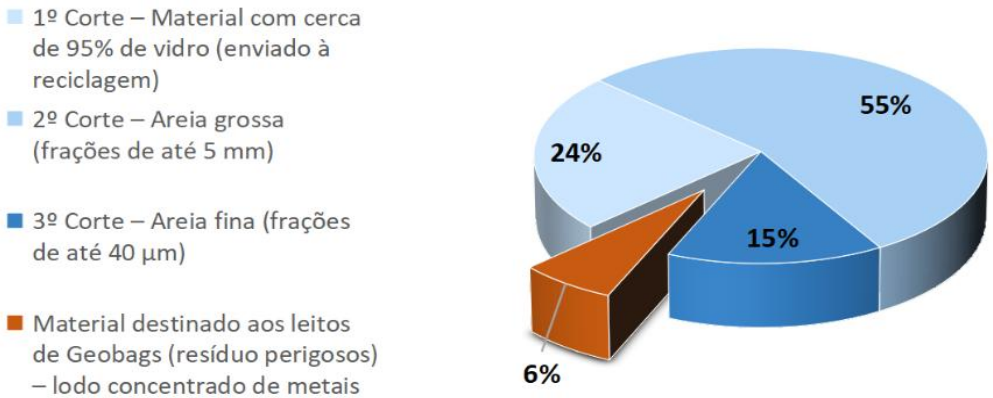


Figura 03: Volumes de materiais tratados por corte no sistema de hidrociclonagem.
Fonte: Sillos (2025).

Resiliência Face às Mudanças Climáticas

Além da comprovada eficácia na remoção de SQIs, a lavagem de solos demonstrou ser uma estratégia altamente vantajosa no contexto de fenómenos meteorológicos extremos associados às mudanças climáticas. A verdadeira dimensão do sucesso desta intervenção (ocorrida em 2021) foi posta à prova durante as cheias extremas de 2024. Em cenários de cheias, a remobilização de metais pesados a partir de solos contaminados constitui um grave risco ecotoxicológico e de saúde pública, especialmente devido à dispersão de lama tóxica para corpos hídricos e áreas residenciais. Como a descontaminação foi concluída preventivamente, com a segregação e isolamento de elementos altamente tóxicos em aterro de Classe I antes das chuvas extremas, o sistema evitou um desastre ambiental secundário. Outras técnicas convencionais, como o encapsulamento *on-site* com

coberturas de argila ou a estabilização química, teriam sido severamente comprometidas pela força do escoamento superficial e pela erosão causada pela enchente. O caso de Canoas comprova, assim, que a remoção física permanente dos contaminantes através da hidrociclonagem confere uma resiliência estrutural e operacional incomparável, protegendo de forma eficaz as comunidades vulneráveis adjacentes face à instabilidade climática.

Sustentabilidade Hídrica e Economia Circular

Um dos grandes diferenciais deste projeto de remediação foi a forte integração com os princípios da economia circular. Em intervenções tradicionais de escavação e disposição em aterro (*dig and dump*), a totalidade do solo contaminado seria tratada como rejeito, exigindo um espaço massivo em aterros industriais e a importação de solo limpo para o reaterro da área escavada, o que geraria uma enorme pegada de carbono associada ao transporte e ao processo de engenharia.

A solução adotada operou em uma lógica de valorização de resíduos. Aproximadamente 93% do volume original (as frações média e grossa de areia) não só foi descontaminado, como foi requalificado como material seguro para reutilização na própria área. Adicionalmente, o processo de lavagem de solo exige, por natureza, um elevado consumo hídrico. Para mitigar este impacto, a central de tratamento foi projetada com um circuito fechado de recirculação, tratando a água utilizada com decantação/flotação com uso de aditivos químicos e retornando ao início do ciclo. Dos cerca de 900 m³ de água que circularam no sistema durante a operação, 90% foram provenientes do aproveitamento direto de águas pluviais captadas na própria bacia de contenção da obra. Esta eficiência hídrica e material demonstra que é possível alinhar a descontaminação ambiental com métricas avançadas de sustentabilidade operacional, fator fundamental para a análise de viabilidade de projetos de remediação ambiental (Sillos, 2006).

Considerações Finais

Este estudo baseou-se nos princípios da remediação resiliente e sustentável, integrados com a urgência crescente de enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas aos projetos de engenharia ambiental. A decisão de remediar o solo contaminado por SQIs, como arsénio e chumbo, que geram risco toxicológico à saúde humana e ao meio ambiente, localmente, com aplicação de um sistema avançado de lavagem de solos baseado em hidrociclonagem, mostrou-se eficaz e resiliente.

A robustez a longo prazo desta intervenção tornou-se evidente durante o evento prolongado de cheias extremas que afetou a região do Rio Grande do Sul em maio de 2024. A eficácia do sistema estendeu-se além da remoção imediata de contaminantes, demonstrando a sua capacidade de atuar como uma medida preventiva contra os impactos de mudanças climáticas. A remoção física e bem-sucedida das SQIs do local, especialmente de solos que mais tarde ficariam submersos durante semanas sob intensas cheias, evitou a potencial mobilização e dispersão de metais pesados ao entorno imediato. Esta ação protetiva foi relevante para salvaguardar a saúde pública, os ecossistemas e as populações vulneráveis residentes nas áreas envolventes.

Os indicadores de desempenho associados ao processo de remediação atestam o sucesso operacional do projeto. Destaca-se a drástica redução de volume, em que apenas 6% do solo tratado (200 m³) foi classificado como resíduo perigoso e destinado de forma segura à aterro industrial licenciado. Outro aspeto importante foi a reutilização hídrica, ao operar num circuito fechado que utilizou cerca de 900 m³ de água, dos quais 90% provieram da captação de águas pluviais, um indicador-chave de economia circular. Além disso, houve a recuperação de materiais, visto que aproximadamente 94% do volume original (areias) foi recuperado com concentrações abaixo dos limites regulatórios, permitindo a sua reutilização no local. Por fim, a mitigação antecipada dos riscos consolidou a área como livre de ameaças ecotoxicológicas significativas antes do desastre meteorológico, impedindo um colapso ambiental secundário durante as cheias.

Conclui-se, por fim, que a adoção de ações de remediação sustentável nos projetos ambientais deve priorizar a resiliência desde a sua fase inicial. As mudanças climáticas constituem uma variável de estresse crítico à estabilidade das intervenções de engenharia, tornando a integração de tecnologias definitivas, como a hidrociclonagem, não apenas recomendável, mas essencial na gestão moderna de passivos ambientais.

Agradecimentos

Paula F. da Silva e M. Graça Brito agradecem o apoio prestado pela Unidade de I&D GEOBIOTEC—UID/04035: GeoBioCiências, GeoTecnologias e GeoEngenharias.

Referências Bibliográficas

Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n.º 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 dez. 2009.

DERMONT, G.; BERGERON, M.; MERCIER, G.; RICHER-LAFLÈCHE, M. Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, n. 1, p. 1-31, 2008.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Summary for policymakers: Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6)**. Genebra, Suíça: IPCC, 2023.

JEZ, E.; LESTAN, D. Remediation of Pb, Zn and Cd contaminated soil by physical-chemical processes. **Environmental Pollution**, v. 218, p. 49-56, 2016.

LAMBERTY, A.; FRANZEN, M. Mapeamento de riscos geológicos associados ao evento climático extremo no Rio Grande do Sul. **Relatório Técnico Preliminar**. Porto Alegre, 2025.

LIBERA, A.; DE BARROS, F. P.; FAYBISHENKO, B.; EDDY-DILEK, C.; DENHAM, M.; LIPNIKOV, K.; WAINWRIGHT, H. Climate change impact on residual contaminants under sustainable remediation. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 226, p. 103518, 2019.

SARMA, H. H.; RAJKUMAR, A.; BARO, A.; DAS, B. C.; TALUKDAR, N. Impact of Heavy Metal Contamination on Soil and Crop Ecosystem with Advanced Techniques to Mitigate Them. **Journal of Advances in Biology and Biotechnology**, v. 27, n. 6, p. 53-63, 2024.

SILLOS, M., DA SILVA, P. F., SUHOGUSOFF, A., & BRITO, G. (2025a). Climate-Resilient and Sustainable Soil Remediation: Hydrocycloning for Metal Removal in Flood-Prone Brazilian Region. *Sustainability*, 17(20), 9083. https://doi.org/10.3390/su17209083

SILLOS, M., BRITO, G., SUHOGUSOFF, A., & SILVA, P. F. da. (2025b). Modelo conceitual multissítios como ferramenta estratégica para gestão de brownfields: O caso do Arco Jurubatuba (Brasil). *Derbyana*, 46. https://doi.org/10.69469/derb.v46.885

SILLOS, M. (2025) Remediação Ambiental Resiliente às Mudanças Climáticas. Proposta de modelo de gestão consorciada de áreas multissítio. Tese de Doutoramento em Engenharia Geológica. Universidade NOVA de Lisboa, Caparica.

SILLOS, M. (2006). Valoração de processos de remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos do petróleo (Dissertação Mestrado). Instituto de Pesquisa Tecnológica. Disponível: https://sapiens.ipt.br/Teses/2006_TA_Marcos_Sillos.pdf

WILDNER, W. et al. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Brasília: Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2008.

XU, L.; ZHAO, F.; XING, X.; PENG, J.; WANG, J.; JI, M.; LI, B.L. A Review on Remediation Technology and the Remediation Evaluation of Heavy Metal-Contaminated Soils. Toxics 2024, 12, 897.

DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DE PROJETO POR ABORDAGENS DETERMINÍSTICA E ESTATÍSTICA

Fabio Martins Nunes, Daniel Henrique Marco Detzel
Universidade Federal do Paraná, e-mail: fabio.mhpb@gmail.com; Universidade Federal do Paraná, e-mail: detzel@ufpr.br

Palavras-chave: Vazão de Projeto; Método estatístico; Método Determinístico.

Resumo

A estimativa de cheias de projeto pode ser realizada por abordagens empíricas, determinísticas e estatísticas. Este estudo avalia vazões de projeto para a porção inicial da bacia do Rio Iguaçu, entre a região metropolitana de Curitiba e Fluviópolis, utilizando métodos direto e indireto. O método direto baseia-se na análise de frequência de vazões máximas anuais, enquanto o indireto considera a frequência de precipitações máximas anuais associada ao modelo chuva-vazão Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV), a partir de hietogramas pré-definidos. Foram analisados períodos de retorno entre 2 e 100 anos, investigando-se a consistência da adoção de um mesmo período de retorno em ambas as abordagens. Os resultados indicam que as condições iniciais da bacia influenciam significativamente a resposta hidrológica, podendo um mesmo evento de precipitação gerar diferentes vazões. Observou-se que a calibração do modelo com eventos extremos produz estimativas consistentes apenas para faixas semelhantes de período de retorno, enquanto tende a subestimar vazões para eventos menos extremos. Por outro lado, calibrações baseadas em eventos frequentes resultam em superestimativas para períodos de retorno mais elevados. Conclui-se que o método indireto apresenta limitações associadas à calibração e às condições iniciais, o que restringe sua aplicabilidade em diferentes escalas de recorrência.

Introdução

A estimativa de cheias de projeto constitui uma das etapas fundamentais no planejamento, dimensionamento e operação de obras hidráulicas, especialmente aquelas associadas à segurança de barragens, sistemas de drenagem e infraestrutura de recursos hídricos. A adequada quantificação dessas cheias está diretamente relacionada à mitigação de riscos hidrológicos e à redução de impactos socioeconômicos decorrentes de eventos extremos.

Historicamente, diferentes abordagens têm sido empregadas para a estimativa de vazões de projeto, podendo ser agrupadas, de forma geral, em métodos empíricos, estatísticos e determinísticos (TUCCI, 2005; NAGHETTINI e PINTO, 2007). Os métodos empíricos, baseados em fórmulas regionais e relações simplificadas, apresentam aplicação limitada, sobretudo em bacias com características distintas daquelas que originaram tais formulações. Em contrapartida, métodos estatísticos e determinísticos têm sido amplamente utilizados em estudos hidrológicos modernos, em função de sua maior capacidade de representação dos processos físicos e da variabilidade hidrológica.

No contexto dos métodos estatísticos, destaca-se a chamada abordagem direta, ou análise de frequência de cheias, que consiste no ajuste de séries históricas de vazões máximas anuais distribuições de probabilidade, com o objetivo de estimar quantis associados a diferentes períodos de retorno (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Entre as distribuições mais utilizadas, a distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV) se destaca pela sua flexibilidade na representação de diferentes comportamentos de cauda, sendo amplamente recomendada em estudos de cheias (FILL, 1994; MARTINS, 2008).

Alternativamente, a estimativa de cheias de projeto pode ser realizada por meio da abordagem indireta, na qual se parte da modelagem das precipitações extremas. Nesse caso, séries históricas de precipitações máximas são analisadas estatisticamente, também com uso de distribuições de probabilidades voltadas a extremos (NAGHETTINI e PINTO, 2007; CARVALHO, 2000). A partir da definição de chuvas de projeto para diferentes períodos de retorno, são elaborados hietogramas representativos, os quais servem como entrada para modelos hidrológicos do tipo chuva–vazão.

Os modelos hidrológicos determinísticos, como o modelo Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV), permitem a transformação da precipitação em vazão, considerando processos como armazenamento no solo, escoamento superficial e subterrâneo, e propagação ao longo da bacia hidrográfica. Essa abordagem possibilita não apenas a estimativa das vazões de pico, mas também a obtenção de hidrogramas completos, fornecendo uma representação mais detalhada da resposta hidrológica da bacia (SEIBERT e VIS, 2012).

A escolha entre as abordagens direta e indireta, bem como dos modelos e distribuições utilizados, depende de fatores como disponibilidade e qualidade dos dados, características da bacia hidrográfica e objetivos do estudo. Em muitos casos, a aplicação conjunta dessas abordagens permite uma análise mais robusta, possibilitando a comparação entre resultados e a avaliação de consistência hidrológica.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo estimar as vazões de projeto para a bacia do rio Iguaçu, por meio da aplicação integrada das abordagens direta e indireta. Para tanto, são utilizadas a distribuição GEV no ajuste das vazões máximas anuais e a distribuição de Gumbel na estimativa das precipitações de projeto, as quais são transformadas em hidrogramas por meio do modelo hidrológico HBV. A comparação entre os resultados obtidos visa avaliar a consistência entre os métodos e contribuir para a compreensão do comportamento hidrológico da bacia em eventos extremos.

Material e Métodos

O modelo HBV é um modelo hidrológico conceitual do tipo chuva–vazão, de caráter semi-distribuído, que representa a dinâmica hidrológica de uma bacia por meio de diferentes reservatórios interconectados. Sua estrutura é tradicionalmente organizada em quatro rotinas principais (Figura 1): (i) rotina de neve, responsável pela acumulação e fusão nival; (ii) rotina de solo, que controla o armazenamento de água no solo, a geração de escoamento e a evapotranspiração; (iii) rotina de resposta ou de água subterrânea, que simula o escoamento subsuperficial por meio de reservatórios lineares; e (iv) rotina de propagação ou escoamento superficial, que representa a transformação do escoamento gerado na bacia até a seção de controle. Essa estrutura modular permite adaptar o modelo às características físicas da bacia estudada, sendo possível simplificar ou suprimir rotinas conforme a relevância dos processos hidrológicos dominantes, como no caso de bacias sem influência de neve.



Figura 21 – Esquema de rotina do modelo HBV.
Fonte: Seibert & Vis (2012)

O funcionamento do HBV baseia-se na alimentação por séries temporais de variáveis hidrometeorológicas, tipicamente precipitação, vazão observada e evapotranspiração potencial, podendo também incorporar temperatura do ar em aplicações que envolvam processos de neve. Esses dados de entrada são processados por um conjunto de parâmetros que representam propriedades físicas e hidrológicas da bacia, como capacidade de armazenamento do solo, coeficientes de recessão e limites de escoamento entre reservatórios (Tabela 1). Embora tais parâmetros não correspondam diretamente a grandezas mensuráveis de forma isolada, sua calibração permite reproduzir o comportamento hidrológico observado, caracterizando o modelo como determinístico na medida em que estabelece relações funcionais entre entradas e saídas do sistema. A definição de intervalos plausíveis para os parâmetros é essencial para garantir consistência física e estabilidade nas simulações.

Parâmetro	**Sigla**	**MIN**	**MAX**
Umidade máxima do solo (mm)	PFC	25	600
Limite da evapotranspiração potencial (mm)	*PLP*	0,3	1
Parâmetro de rotina de solo (-)	*PBETA*	0,1	10
Taxa máxima de recarga entre res. superior e inferior (mm/d)	*PPERC*	0,01	500
Limite da zona superior (mm)	*PUZL*	0	1000
Coeficiente de Recessão do reservatório superior (d^{-1})	*PK0*	0	1
Coeficiente de Recessão do reservatório superior (d^{-1})	*PK1*	0	1
Coeficiente de Recessão do reservatório Inferior (d^{-1})	*PK2*	0	1
Transformação do escoamento (mm/d)	*PMAXBAS*	1	10

Tabela 7 - Parâmetros e limites do modelo HBV.
Fonte: Seibert & Vis (2012)

A calibração do modelo HBV consiste na identificação do conjunto de parâmetros que melhor reproduz as vazões observadas a partir das entradas fornecidas. Para isso, são empregadas funções objetivo que avaliam o desempenho do modelo sob diferentes aspectos do hidrograma simulado. A função de Nash–Sutcliffe (Eq. 1) é amplamente utilizada como métrica global de ajuste, permitindo avaliar a capacidade do modelo em reproduzir a variabilidade das vazões observadas. Complementarmente, métricas específicas como o erro na vazão de pico (Eq. 2) e o erro no volume do hidrograma (Eq. 3) são incorporadas com o objetivo de melhorar a representação de eventos extremos e do balanço hídrico total. A utilização conjunta dessas funções possibilita uma calibração mais robusta, equilibrando o ajuste entre diferentes regimes de escoamento e reduzindo vieses associados a uma única métrica de desempenho.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=o}^{n}(Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=o}^{n}(Q_{obs,i} - Q_{med,obs})^2} \quad (01)$$

$$ERQ = \frac{Q_{picoobs}}{Q_{picosim}} \quad (02)$$

$$ERV = \frac{V_{obs}}{V_{sim}} \quad (03)$$

Sendo:
NS : Coeficiente de Nash_Sutcliffe;
$Q_{obs,i}$: Vazão observada, em m³/s;
$Q_{sim,i}$: Vazão simulada, em m³/s;
$Q_{med,obs}$: Vazão média observada, em m³/s;
$Q_{picoobs}$: Vazão máxima observada, em m³/s;
$Q_{picosim}$: Vazão máxima simulada, em m³/s;
V_{obs} : Volume do hidrograma observado, em m³/s;
V_{sim} : Volume do hidrograma simulado, em m³/s;

As distribuições de probabilidade adotadas neste estudo são a distribuição de Gumbel para modelagem de precipitações máximas e a distribuição generalizada de valores extremos (GEV) para modelagem de vazões máximas anuais. No contexto metodológico, tais distribuições são empregadas de forma distinta e complementar: a distribuição de Gumbel é utilizada na abordagem indireta, para estimativa das precipitações associadas a diferentes períodos de retorno, as quais subsidiam a construção dos hietogramas de projeto; por sua vez, a distribuição GEV é aplicada na abordagem direta, por meio do ajuste às séries de vazões máximas anuais observadas, permitindo a estimativa direta das vazões de projeto.

A escolha dessas distribuições baseia-se em critérios amplamente discutidos na literatura hidrológica. Conforme Santos (2012), a seleção de modelos probabilísticos pode se apoiar em fundamentos teóricos, testes de aderência, recomendações normativas, robustez estatística e critérios conservadores. Neste estudo, adota-se o critério de robustez, respaldado por investigações como Fill (1994) e Martins (2008), que indicam a distribuição GEV como uma das mais adequadas para modelagem de extremos hidrológicos, especialmente quando associada a estimativas regionais de parâmetros. Para precipitações intensas no estado do Paraná, estudos como Carvalho (2000) apontam a distribuição de Gumbel como apropriada para representação de máximos anuais. Adicionalmente, testes de aderência, como Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado, são utilizados como ferramentas auxiliares na verificação do ajuste das distribuições aos dados observados.

A estimativa dos parâmetros das distribuições de probabilidade constitui etapa fundamental na análise de frequência. Dentre os métodos mais empregados, destacam-se o método dos momentos (MOM), o método da máxima verossimilhança (MMV) e o método dos momentos lineares (MOM-L). O método dos momentos apresenta simplicidade de aplicação, porém pode resultar em estimativas menos eficientes e mais sensíveis à presença de outliers, especialmente no que se refere ao parâmetro de forma (LOUCKS et al., 1981; SANTOS, 2012). Por sua vez, os estimadores de máxima verossimilhança possuem propriedades assintóticas desejáveis, como consistência, invariância e eficiência, embora sua aplicação em amostras reduzidas possa comprometer a robustez dos resultados (SANTOS, 2012). Nesse contexto, os momentos lineares (MOM-L), introduzidos por Hosking (1986), destacam-se por sua maior robustez em amostras finitas e menor sensibilidade a valores extremos, além de apresentarem desempenho comparável ao MMV e maior simplicidade de aplicação. Estudos indicam que o método MOM-L é particularmente adequado para a estimativa de parâmetros da distribuição GEV, sendo recomendado em análises hidrológicas (HOSKING, 1985; 1987; FILL, 1994; STEDINGER et al., 1993; SANTOS, 2012). Assim, neste trabalho, a estimativa dos parâmetros das distribuições Gumbel e GEV foi realizada por meio do método dos momentos lineares.

A determinação dos hietogramas de projeto, necessários à aplicação do modelo hidrológico na abordagem indireta, é realizada a partir de um procedimento empírico baseado na análise de eventos históricos. Inicialmente, são selecionados os maiores eventos anuais de precipitação e vazão, a partir dos quais se define uma duração característica dos episódios críticos. Em seguida, realiza-se a análise de frequência dos totais precipitados para essa duração, com ajuste pela distribuição de Gumbel. A desagregação temporal da chuva é conduzida com base em um hietograma típico observado, selecionado por apresentar coerência entre precipitação e resposta hidrológica da bacia. Por fim, os hietogramas de projeto para diferentes períodos de retorno são obtidos por escalonamento proporcional desse padrão temporal, garantindo consistência entre magnitude e distribuição intraevento da precipitação. Esses hietogramas constituem os dados de entrada fundamentais para o modelo hidrológico chuva–vazão HBV, possibilitando a simulação dos hidrogramas de cheia e a estimativa das vazões de projeto pela abordagem indireta.

Estudo de Caso

Para aplicação dos métodos expostos, foi escolhida a porção inicial da bacia do Rio Iguaçu, considerando o histórico de eventos extremos de cheia que afetam a região. A área de estudo compreende a porção da bacia hidrográfica do rio Iguaçu a montante da estação fluviométrica de Fluviópolis, localizada no estado do Paraná, abrangendo uma área de drenagem de aproximadamente 18.600 km².

Inserida no contexto do Alto Iguaçu até o trecho de transição geomorfológica do segundo planalto, essa região apresenta características hidrológicas relevantes para estudos de cheias. O rio, até esse ponto, desenvolve-se em vales amplos, com baixa declividade e presença de extensas áreas de várzea, favorecendo o armazenamento temporário de volumes significativos de água (MAACK, 1981). A jusante, ao transpor a escarpa devoniana, o sistema fluvial passa a apresentar maior declividade e confinamento, com formação de corredeiras e vales encaixados, condição que potencializa a propagação de ondas de cheia (MINE, 1998). A Figura 2 exibe o perfil longitudinal do rio até a usina hidrelétrica de Foz do Areia, que opera na cabeceira da bacia. Além dos aspectos fisiográficos, destaca-se a influência antrópica na bacia, especialmente na região do Alto Iguaçu, caracterizada por elevado grau de urbanização e alteração do uso do solo, com impactos diretos nos processos de infiltração e escoamento superficial (DURÃES et al., 2016).

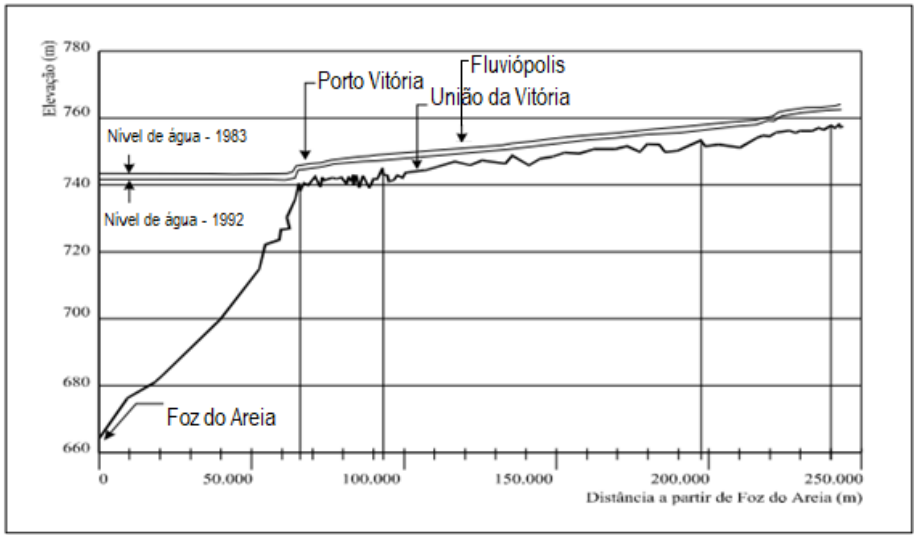


Figura 22 - Perfil do Rio Iguaçu até Foz do Areia
Fonte: Adaptado de Mine (1998)

Os dados hidrológicos utilizados neste estudo compreendem séries históricas de vazões médias diárias obtidas na estação fluviométrica de Fluviópolis, no período de 1976 a 2014, as quais subsidiam tanto a abordagem determinística quanto a estatística. Para a aplicação do método direto, foi construída a série de vazões máximas anuais, enquanto, para a abordagem indireta, foram selecionados eventos representativos de cheia para calibração e verificação do modelo hidrológico. No que se refere à precipitação, foram utilizados dados provenientes de múltiplas estações pluviométricas distribuídas na bacia, com diferentes períodos de disponibilidade. A estimativa da precipitação média areal foi realizada por meio do método dos polígonos de Thiessen, permitindo a obtenção de séries consistentes mesmo diante de lacunas nos registros observacionais. Para isso, foram definidos períodos homogêneos de análise, compatibilizando a disponibilidade de dados pluviométricos com a série fluviométrica, garantindo coerência temporal entre as variáveis de entrada do modelo.

A evapotranspiração potencial adotada no estudo foi estimada com base nos resultados apresentados por Ploszai (2020), que calculou séries para estações meteorológicas representativas do estado do Paraná, incluindo a estação de Fernandes Pinheiro, situada próxima à área de estudo. O método utilizado foi o de Thornthwaite (1948), que estima a evapotranspiração a partir da temperatura média do ar e de um índice térmico característico da região. Embora reconhecidamente simplificado quando comparado a métodos mais robustos, seu uso é justificado no presente contexto por se tratar de um estudo focado em eventos de cheia, nos quais a influência da evapotranspiração sobre a resposta hidrológica é secundária. A partir das séries disponíveis, foram determinados valores médios mensais de longo termo, os quais foram utilizados como dados de entrada no modelo hidrológico, assegurando consistência com a escala temporal adotada na simulação.

Procedimento de Aplicação da Metodologia

A aplicação da metodologia proposta neste estudo foi estruturada em duas abordagens complementares para estimativa das vazões de projeto: (i) abordagem indireta, baseada na transformação chuva–vazão por meio de modelo hidrológico, e (ii) abordagem direta, fundamentada na análise estatística de vazões máximas anuais observadas. Ambas as abordagens foram desenvolvidas a partir de uma base comum de dados hidrológicos e meteorológicos, previamente tratada e compatibilizada, garantindo consistência entre as etapas de modelagem e análise.

No método indireto, o processo inicia-se com a seleção e caracterização de eventos críticos de precipitação e vazão observados na bacia, com destaque para episódios históricos de cheia, como os ocorridos nos anos de 1983 e 1992, amplamente reconhecidos por sua magnitude e impacto regional. A partir da análise desses eventos, foi determinada uma duração média característica dos episódios pluviais associados às cheias, resultando na adoção de um período representativo de 19 dias. Para essa duração, realizou-se a análise de frequência das precipitações acumuladas, com ajuste pela distribuição de Gumbel, permitindo a estimativa dos totais precipitados associados a diferentes períodos de retorno. Na sequência, procedeu-se à construção dos hietogramas de projeto, por meio da desagregação temporal baseada em um evento típico observado, selecionado

por apresentar coerência entre a distribuição temporal da precipitação e a resposta hidrológica da bacia. Esses hietogramas foram então utilizados como dados de entrada no modelo hidrológico HBV, previamente calibrado e verificado com base em eventos históricos, possibilitando a simulação dos hidrogramas de cheia e a obtenção das vazões de pico correspondentes a cada período de retorno analisado.

Ainda no contexto da abordagem indireta, destaca-se que a calibração do modelo HBV constitui etapa fundamental para a confiabilidade dos resultados, sendo realizada a partir da comparação entre vazões simuladas e observadas, considerando múltiplas funções objetivo. Uma vez calibrado e validado, o modelo é aplicado de forma determinística, assumindo que os parâmetros obtidos representam adequadamente o comportamento hidrológico da bacia. Dessa forma, as incertezas associadas à estimativa das precipitações de projeto propagam-se na resposta hidrológica simulada, refletindo-se diretamente nas vazões de projeto obtidas.

Na abordagem direta, por sua vez, utiliza-se a série histórica de vazões máximas anuais observadas na estação fluviométrica de Fluviópolis para ajuste da distribuição generalizada de valores extremos (GEV). A partir desse ajuste, são estimadas diretamente as vazões associadas a diferentes períodos de retorno, sem a necessidade de transformação intermediária via precipitação. Essa abordagem, de natureza estritamente estatística, fornece estimativas independentes daquelas obtidas pelo modelo hidrológico, constituindo uma base de comparação fundamental para a avaliação dos resultados da abordagem indireta.

Resultados e Discussão

A aplicação das abordagens direta e indireta para estimativa das vazões de projeto permitiu a obtenção de resultados distintos, porém complementares, possibilitando uma análise integrada do comportamento hidrológico da bacia em estudo. A seguir, são apresentados os principais resultados obtidos, bem como sua interpretação à luz das metodologias empregadas.

No âmbito da abordagem indireta, a definição dos hietogramas de projeto foi realizada a partir da análise conjunta dos eventos históricos de precipitação e suas respectivas respostas hidrológicas na bacia. Inicialmente, procedeu-se à avaliação dos principais eventos de cheia registrados na série histórica, com destaque para episódios extremos, cujos hietogramas e hidrogramas associados foram analisados de forma integrada. Verificou-se que, dentre os eventos avaliados, a cheia de 1992 apresentou a distribuição temporal de precipitação mais bem definida e consistente em termos de relação chuva–vazão, sendo, portanto, adotada como evento de referência para a construção do hietograma típico. A partir desse padrão temporal, realizou-se a desagregação dos totais precipitados estimados pela distribuição de Gumbel, previamente ajustada aos dados de precipitação acumulada para duração característica de 19 dias, permitindo a obtenção dos hietogramas de projeto correspondentes a diferentes períodos de retorno (Tabela 3).

Definidos os hietogramas de projeto para diferentes períodos de retorno, procedeu-se à calibração e verificação do modelo hidrológico HBV com vistas à estimativa das vazões de projeto pela abordagem indireta. Considerando as características da bacia em estudo, a rotina de neve do modelo não foi utilizada, uma vez que tal processo não é representativo na região analisada. A calibração foi conduzida a partir de séries contínuas de dados no período de 1976 a 2014, estratégia necessária para contornar as limitações do modelo em aplicações pontuais, dado que o HBV foi originalmente concebido para simulação contínua com período de aquecimento. A extração dos resultados foi realizada de forma específica para os eventos de cheia, permitindo avaliar o desempenho do modelo por meio das funções-objetivo adotadas. Os resultados indicaram desempenho satisfatório global, com coeficientes de Nash-Sutcliffe elevados na maioria dos eventos e erros de vazão de pico e volume dentro de faixas aceitáveis, ainda que com variabilidade associada às características específicas de cada evento (Tabela 2).

Ano	Nash-Sutcliffe	Vazão de pico (%)	Volume de Pico (%)
1982	0,92754	101,50%	99,16%
1983	0,97446	107,01%	97,76%
1987	0,94115	99,19%	104,96%
1990	0,93978	88,48%	101,31%
1992	0,94690	114,14%	96,15%
1993	0,96671	113,05%	97,71%
1995	0,97368	109,38%	96,33%
1997	0,99507	99,17%	99,58%
2005	0,78116	116,82%	109,85%
2009	0,92799	105,00%	105,25%
2010	0,88635	106,54%	90,11%
2013	0,96289	102,48%	97,72%
2014	0,81673	100,76%	128,60%

Tabela 8 - Resultados das Funções Objetivo por evento de cheia

A etapa de verificação evidenciou a sensibilidade dos parâmetros calibrados à magnitude dos eventos utilizados como referência. Observou-se que conjuntos de parâmetros ajustados com base em eventos de menor magnitude tendem a superestimar vazões de projeto associadas a maiores períodos de retorno, enquanto parâmetros calibrados a partir de eventos extremos, como os registrados em 1983, 1992 e 2014, apresentam melhor desempenho para grandes cheias, porém com tendência à subestimação em eventos menos severos. Tal comportamento indicou a impossibilidade de definição de um único conjunto de parâmetros

representativo para toda a faixa de períodos de retorno analisada. Assim, optou-se por avaliar múltiplos conjuntos de parâmetros, selecionados a partir de seis eventos representativos, incluindo aqueles com melhor desempenho nas etapas de calibração/verificação e os de maior magnitude histórica, permitindo uma análise mais robusta da resposta hidrológica da bacia frente a diferentes cenários de precipitação de projeto.

	HIETOGRAMAS (mm)								
	Precipitações observadas em 1992	**Estimados**							
Tempo (dias)	**Períodos de Retorno (anos)**								
	Tr= 86 anos	**2**	**5**	**10**	**20**	**30**	**50**	**85**	**100**
	Precipitações acumuladas (mm)								
	444	**203**	**270**	**314**	**357**	**381**	**412**	**443**	**453**
	Precipitações discretizadas (mm)								
1	40	19	24	29	33	35	38	40	41
2	5	2	3	3	4	4	4	5	5
3	3	1	2	2	2	2	2	3	3
4	4	2	2	3	3	3	3	4	4
5	3	1	2	2	2	2	2	3	3
6	27	12	16	19	21	23	25	27	27
7	1	0,4	0,6	1	1	1	1	1	1
8	2	1	1	1	2	2	2	2	2
9	33	15	20	23	27	29	31	33	34
10	1	0,4	1	1	1	1	1	1	1
11	1	0,4	1	1	1	1	1	1	1
12	1	0,2	0,3	0,4	0,4	1	1	1	1
13	41	19	25	29	33	35	38	41	42
14	37	17	23	26	30	32	35	37	38
15	136	62	82	96	109	117	126	135	139
16	39	18	24	27	31	33	36	39	39
17	62	29	38	44	50	54	58	62	64
18	5	2	3	4	4	4	5	5	5
19	3	1	2	2	2	2	3	3	3
soma	444	203	270	314	357	381	412	443	453

Tabela 9 - Hietograma de Projeto para diferentes períodos de retorno

No método direto, a estimativa das vazões de projeto foi realizada a partir do ajuste da distribuição generalizada de valores extremos (GEV) à série de vazões máximas anuais da estação fluviométrica de Fluviópolis. O ajuste foi avaliado com base em critérios de aderência e consistência dos quantis estimados. Os resultados indicaram boa representação estatística da série histórica, especialmente para períodos de retorno intermediários e elevados, evidenciando a capacidade da distribuição GEV em capturar o comportamento assintótico dos extremos hidrológicos. As vazões de projeto obtidas apresentaram crescimento coerente com o aumento do período de retorno, constituindo uma referência direta e independente da modelagem chuva–vazão para fins de comparação com os resultados da abordagem indireta.

A análise conjunta das frequências de precipitação e vazão permitiu avaliar a hipótese frequentemente adotada em estudos hidrológicos de equivalência entre períodos de retorno de chuva e de cheia (Figura 3).

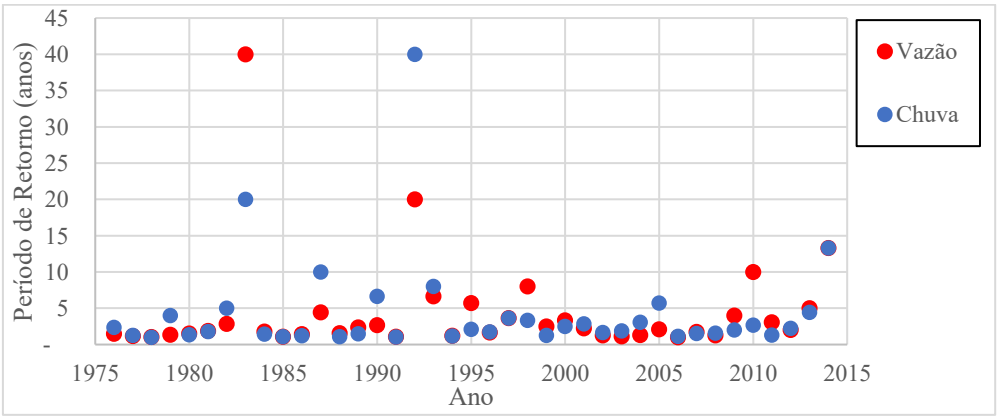


Figura 23 - Períodos de Retorno de chuva e Vazão obtidos por análise de frequência empírica

Os resultados evidenciaram que essa correspondência não se verifica de forma rigorosa na bacia em estudo, uma vez que a transformação chuva–vazão é mediada por processos hidrológicos não lineares, como armazenamento no solo, propagação do escoamento e condições antecedentes de umidade. Observou-se que eventos pluviométricos associados a um determinado período de retorno não necessariamente resultam em vazões de mesma recorrência, indicando que a adoção direta dessa equivalência pode introduzir inconsistências na estimativa de cheias de projeto, especialmente quando desconsideradas as características físicas e hidrodinâmicas da bacia hidrográfica.

A comparação entre as vazões de projeto estimadas pelos métodos direto e indireto (Figura 4) revelou diferenças sistemáticas associadas às premissas e limitações de cada abordagem. De modo geral, o método indireto apresentou maior sensibilidade aos parâmetros de calibração do modelo hidrológico e à definição do hietograma de projeto, resultando em uma faixa de valores de vazão para um mesmo período de retorno. Por outro lado, o método direto, por se basear exclusivamente na análise estatística das vazões observadas, forneceu estimativas mais estáveis, porém dependentes da qualidade e extensão da série histórica. Para períodos de retorno mais elevados, observou-se tendência de divergência entre os métodos, com o modelo hidrológico refletindo de forma mais explícita os processos físicos da bacia, enquanto a abordagem estatística projeta o comportamento extremo a partir da extrapolação dos dados observados. Essa comparação reforça a importância da utilização complementar de ambas as abordagens na avaliação de cheias de projeto, permitindo uma análise mais abrangente e crítica dos resultados obtidos.

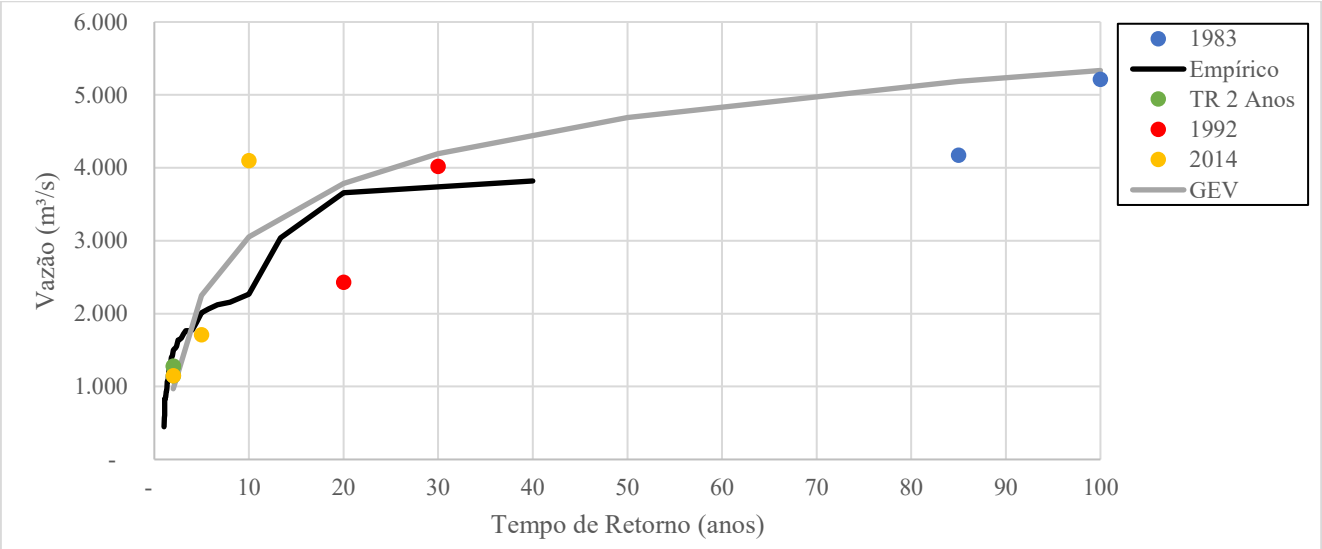


Figura 24 - Comparações de resultados obtidos pelos métodos direto e indireto

Considerações finais

Os resultados deste estudo evidenciam que as abordagens direta e indireta para estimativa de cheias de projeto apresentam características complementares. O método direto, baseado na análise estatística das vazões máximas anuais, mostrou-se robusto e consistente, especialmente para a extrapolação de períodos de retorno elevados, enquanto o método indireto, por meio da modelagem chuva–vazão com o modelo HBV, possibilitou a obtenção não apenas das vazões de pico, mas também dos hidrogramas de projeto completos, configurando uma vantagem relevante para aplicações que demandam análise temporal do escoamento.

A aplicação do modelo HBV demonstrou bom desempenho na bacia estudada, com resultados satisfatórios de calibração e verificação, mesmo sem a consideração da rotina de neve, não representativa para a região. Entretanto, os resultados indicaram elevada sensibilidade à escolha dos eventos utilizados na calibração, evidenciando que a adoção de um único conjunto de parâmetros pode não ser adequada para representar toda a faixa de períodos de retorno. Observou-se que parâmetros calibrados com base em eventos extremos tendem a representar melhor cheias de maior magnitude, enquanto eventos de menor porte influenciam de forma distinta a resposta do modelo, reforçando a necessidade de análise criteriosa por parte do hidrólogo.

As diferenças observadas entre as vazões de projeto estimadas pelos métodos direto e indireto refletem, em grande parte, a natureza dos dados de entrada e os processos considerados em cada abordagem. A não equivalência entre períodos de retorno de precipitação e vazão, evidenciada neste estudo, reforça a importância de se considerar explicitamente os processos de transformação chuva–vazão, sobretudo em bacias com comportamento hidrológico complexo. Adicionalmente, limitações relacionadas à disponibilidade e extensão das séries históricas de dados hidrometeorológicos se mostraram relevantes, influenciando a confiabilidade das estimativas, especialmente para eventos raros.

Por fim, destaca-se que os resultados obtidos são condicionados às características específicas da bacia do rio Iguaçu analisada. Recomenda-se a ampliação de estudos comparativos em bacias com diferentes condições fisiográficas e hidrológicas, bem como a avaliação de outras distribuições de probabilidade e critérios de ajuste, de modo a aprofundar a compreensão sobre as potencialidades e limitações das abordagens empregadas na estimativa de cheias de projeto.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos professores e colaboradores que contribuíram para o desenvolvimento deste estudo, em especial à Professora Miriam Mine, ao Professor Heinz Fill e à Carolina Natel. Agradecem também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental e à Universidade Federal do Paraná pelo apoio institucional.

Referências Bibliográficas

CARVALHO, M. C. L. Análise regional da precipitação máxima provável do Estado do Paraná. *Dissertação de Mestrado,* UFPR. 2000.

DURÃES, M. F.; FILHO, J. A. P. C.; OLIVEIRA, V. A. Vulnerabilidade à erosão hídrica e taxa de aporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Iguaçu – PR. *RBRH*, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 728-741, out./dez. 2016

FILL, H.D. (1994). Improving flood quantile estimates using regional information. *Ph-D Dissertation, Cornell University*, Ithaca, New York, 256p.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J.R.; WOOD, E.F. (1985). Estimation of the Generalized Extreme Value Distribution by the Method of Probability Weighted Moments. *Tecnometrics, v*ol. 27, no. 3, pp. 351-261.

HOSKING, J. R. M., (1986). The theory of Probability Weighted Moments. Research Report RC (12210, *IBM Research Division,* Yorkton Heights, New York.

HOSKING, J.R.M.; WALLIS, J.R. (1987). Parameter and Quantile Estimation of the Generalized Pareto Distribution, *Technometrics*, vol 29, no 3, pp. 339-349.

LOUCKS, D. P., STEDINGER, J. R., Water Resources Systems, Planning and Analysis, *Prentice Hall, Englewood Cliffs,* 1981.

MAACK, R. *Geografia Física do Estado do Paraná*. 2ª Edição. Rio de Janeiro; Curitiba: Secretaria da Cultura e do Esporte do Governo do Estado do Paraná, 1981.

MARTINS, E. S. P. R. Uso de Informação Regional na Estimativa de Quantis de Cheia GEV. RBRH — *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 13 n.2 Abr/Jun 2008.

MINE, M. R. M. Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias. Porto Alegre: UFRGS-IPH, *Tese (Doutorado)*, UFRGS, 1998.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. DE A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2007. 552 p.

PLOSZAI, R. (2020) CLIMATE CHANGE SCENARIOS IN THE PARANA STATE: A NONSTATIONARY ANALYSIS USING DROUGHT INDICES. Universidade Federal do Paraná. *Tese de Doutorado*. Departamento de Hidráulica e Saneamento, Curitiba, V.1, 215 PAG.

SANTOS, P. Análise de frequência e regionalização de Vazões Máximas sazonais na região sul do Brasil. *Dissertação de Mestrado*, UFPR. 2012.

SEIBERT, J. VIS, M. J. P. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Zurich Open Repository and Archive*, 2012.

STEDINGER, J.R.; VOGEL, R.M.; GEORGIOU E.F. (1993). Frequency analysis of extreme events, in *Handbook of Hydrology, chapter 18*, editor chief D.J. Maidement, McGraw Hill, New York. pp 18.1-18.66.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, New York, v.38, n.1, p.55-94, 1948.

TUCCI, C. E. M. *Gestão de Águas Pluviais Urbanas.* Ministério das Cidades – Global Water Partnership - Wolrd Bank – Unesco. 2005.

ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO DE EQUAÇÕES IDF GERAL E ESPECÍFICA POR PERÍODO DE RETORNO NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

1 Raíssa Soares de Lima Oliveira, 2 Marcelo de Miranda Reis, 3 Igor da Silva Rocha Paz
[1] [IME], e-mail: [soares.raissa@ime.eb.br]; [2] [IME], e-mail: [marceloreis@ime.eb.br]; [3] [IME], e-mail: [igorpaz@ime.eb.br]

Palavras-chave: chuvas intensas; análise de frequência; períodos de retorno.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo analisar a calibração de equações de chuvas intensas em diferentes períodos de retorno, a partir da aplicação de técnicas de análise de frequência e ajuste de equações Intensidade-Duração-Frequência (IDF) no estado do Rio de Janeiro. Foram utilizados dados de precipitação máxima diária anual de três postos pluviométricos representativos de distintas isozonas pluviométricas. Para cada posto, foram ajustadas oito distribuições de probabilidade: Exponencial, Gamma, GEV, Gumbel, LN-2P, LN-3P, Pearson III e Log-Pearson III, por meio do software ALEA, para períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos, sendo a seleção baseada no teste de Kolmogorov-Smirnov. As precipitações estimadas foram desagregadas em durações inferiores a 24 horas pela metodologia de Taborga Torrico. A partir dessas precipitações desagregadas, foram calculadas as intensidades de chuva, definidas como a razão entre a altura precipitada e a duração do evento. A partir dessas intensidades, os parâmetros das equações IDF foram calibrados via minimização do erro médio quadrático com o uso do Solver do Excel, considerando duas abordagens: uma equação geral, válida para todos os períodos de retorno, e equações específicas ajustadas individualmente para cada tempo de recorrência. Os resultados evidenciam diferenças entre as intensidades estimadas pelas duas abordagens, especialmente para maiores períodos de retorno, indicando que a calibração individualizada proporciona maior precisão na representação das chuvas intensas. Além disso, observam-se variações regionais entre as isozonas, refletindo a heterogeneidade espacial da precipitação no estado. Conclui-se que a escolha da estratégia de calibração influencia diretamente os valores das equações IDF, sendo fundamental sua adequada definição para o dimensionamento de obras hidráulicas.

Introdução

A precipitação máxima diária constitui uma das variáveis hidrológicas de maior relevância para o dimensionamento de obras de infraestrutura hidráulica, drenagem urbana e controle de cheias, sendo fundamental para a definição de parâmetros utilizados no dimensionamento e verificação de estruturas hidráulicas, especialmente em um contexto de mudanças climáticas e alteração dos padrões de precipitação (OLIVEIRA et al., 2020).

A análise de frequência de chuvas intensas baseia-se no ajuste de distribuições de probabilidade às séries históricas de precipitação máxima anual, permitindo estimar quantis para diferentes períodos de retorno. A seleção da distribuição mais adequada é etapa crítica, visto que diferentes funções podem fornecer estimativas com variações expressivas para períodos de retorno elevados (SILVEIRA, 2016; FILL, 2011). Para viabilizar esse processo, foi utilizado o software ALEA, desenvolvido pela Universidade Federal do Paraná, que disponibiliza ferramentas para ajuste de múltiplas distribuições e realização de testes de aderência (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

As isozonas, definidas como regiões de pluviometria estatisticamente homogênea, têm sido adotadas como base para a regionalização hidrológica no Brasil (GEORIO, 1996; DRM-RJ, 2021). A adoção de um posto pluviométrico por isozona permite capturar o comportamento hidrológico característico de cada região, garantindo representatividade espacial na análise. Nesse contexto, foram selecionados três postos pluviométricos, cada um pertencente a uma isozona distinta, submetidos à análise de frequência e à obtenção das equações IDF por meio da metodologia de Taborga Torrico e calibração via Solver do Excel.

O presente trabalho tem como objetivo calibrar equações de chuvas intensas (IDF) para três postos pluviométricos inseridos em isozonas distintas, comparando o desempenho de equações com coeficientes únicos para todos os períodos de retorno frente a equações ajustadas individualmente para cada tempo de recorrência, a fim de avaliar qual abordagem proporciona melhor representação das precipitações intensas em cada região.

Material e Métodos

Seleção dos Postos Pluviométricos

Os postos foram selecionados segundo os critérios: (i) representatividade espacial de cada isozona; (ii) série histórica de precipitação máxima diária anual com no mínimo 30 anos; (iii) ausência de falhas superiores a 10% do total; e (iv) disponibilidade no banco de dados da ANA — HidroWeb. Os postos selecionados estão descritos na Tabela 01.

Isozona	Posto / Código	Município	Latitude	Longitude	Alt. (m)	Anos Consistidos	Anos Totais
D	Posto Porciuncula (2042027)	Porciúncula	20°58'09"S	42°03'06"W	188	79	85
E	Posto Fazenda São João (2242005)	Nova Friburgo	22°23'25"S	42°29'40"W	960	55	57
F	Posto Vila Mambucaba (2344016)	Angra dos Reis	23°01'32"S	44°31'05"W	10	41	42

Tabela 01: Caracterização dos postos pluviométricos selecionados.
Fonte: ANA/HidroWeb (2024)

Ajuste de Distribuições — Software ALEA

Para cada posto foram ajustadas oito distribuições de probabilidade: Exponencial, Gamma, GEV, Gumbel, LN-2P, LN-3P, Pearson III e Log-Pearson III, pelos métodos da Máxima Verossimilhança (MMV), dos Momentos (MOM) e dos Momentos Lineares (MML), para períodos de retorno de T = 5, 10, 25, 50 e 100 anos. A seleção da melhor distribuição baseou-se no teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) ao nível de 5% de significância, adotando-se a distribuição com maior p-valor entre as não rejeitadas, critério que favorece a distribuição com melhor aderência estatística aos dados observados.

Desagregação e Equações IDF

As precipitações diárias estimadas foram desagregadas em durações de 5 a 1440 minutos pela metodologia de Taborga Torrico (1974), que estabelece fatores empíricos de desagregação entre diferentes intervalos de tempo. A partir dos volumes desagregados, calcularam-se as intensidades pluviométricas pelo quociente entre a altura precipitada (mm) e a duração do evento (h).

As equações IDF foram ajustadas na forma potencial generalizada, expressa por:

$$i = \frac{a\,T^{b}}{(t+c)^{d}} \qquad (01)$$

Onde: i representa a intensidade da chuva (mm/h), T o período de retorno (anos), t a duração da precipitação (min ou h), e a, b, c e d são parâmetros empíricos obtidos por meio de calibração.

Os parâmetros foram obtidos via minimização do erro médio quadrático entre intensidades observadas e estimadas, utilizando o Solver do Excel. Foram obtidas uma equação geral (válida para todos os TR) e equações específicas para cada período de retorno.

Resultados e Discussão

Seleção das Distribuições e Precipitações Estimadas

Os resultados dos testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov para os três postos são sintetizados na Tabela 02, apresentando apenas a distribuição de melhor aderência por posto.

Isozona	Posto Pluviométrico	Distribuição selecionada	Método	Estat. KS	p-valor
D	2042027 — Porciuncula	LN-3P	MML	0,0677	0,9305
E	2242005 — Fazenda São João	GAMMA	MMV	0,0580	0,9887
F	2344016 — Vila Mambucaba	PEARSON-3	MMV	0,0767	0,9672

Tabela 02: Distribuição de melhor aderência (KS) por posto pluviométrico.
Fonte: Resultados obtidos pelo ALEA

Os elevados p-valores obtidos indicam boa aderência das distribuições selecionadas às séries históricas analisadas. Em todos os postos, os coeficientes de assimetria positivos justificam a adoção de distribuições assimétricas, e todos os ajustes testados foram aprovados no teste KS ao nível de 5% de significância.

Posto 2042027 — Porciuncula

O Posto Porciúncula, localizado no município de Porciúncula, na região Noroeste Fluminense do estado do Rio de Janeiro, apresenta série histórica de 85 anos (1939–2024). A precipitação máxima diária média foi de 152,8 mm, desvio padrão de 22,23 mm e coeficiente de variação de 0,272, indicando moderada variabilidade interanual. O coeficiente de assimetria positivo (Cs = 0,875) justifica a adoção de distribuições assimétricas. Todos os ajustes foram aprovados no teste KS a 5% de significância, sendo a distribuição LN-3P (MML) selecionada com D = 0,0677 e p-valor = 0,9305.

Posto 2242005 — Fazenda São João

O Posto Fazenda São João (2242005), localizado no município de Nova Friburgo, na região serrana do estado do Rio de Janeiro, apresenta série histórica de 57 anos (1967-2024). A precipitação máxima diária média foi de 255,0 mm, desvio padrão de 36,83 mm e coeficiente de variação de 0,324, indicando moderada variabilidade interanual. O coeficiente de assimetria positivo (Cs = 1,425) justifica a adoção de distribuições assimétricas. Todos os ajustes foram aprovados no teste KS a 5% de significância, sendo a distribuição Gamma (MMV) selecionada com D = 0,0580 e p-valor = 0,9887.

Posto 2344016 — Vila Mambucaba

O Posto Vila Mambucaba (2344016), localizado no município de Angra dos Reis, na região sul fluminense do estado do Rio de Janeiro, apresenta série histórica de 42 anos (1982-2024). A precipitação máxima diária média foi de 375,2 mm, desvio padrão de 69,86 mm e coeficiente de variação de 0,465, indicando elevada variabilidade interanual. O coeficiente de assimetria positivo (Cs = 1,307) justifica a adoção de distribuições assimétricas. Todos os ajustes foram aprovados no teste KS a 5% de significância, sendo a distribuição Pearson III (MMV) selecionada com D = 0,0767 e p-valor = 0,9672.

Precipitações Máximas Diárias Estimadas por posto

A partir das distribuições selecionadas para cada posto pluviométrico, foram estimados os valores de precipitação máxima diária para os períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos. A Tabela 03 apresenta os resultados obtidos para cada posto, permitindo a comparação entre os diferentes regimes pluviométricos representados pelos postos analisados.

Posto Pluviométrico	Distribuição	TR = 5 anos (mm)	TR = 10 anos (mm)	TR = 25 anos (mm)	TR = 50 anos (mm)	TR = 100 anos (mm)
2042027	LN-3P	97,89	111,50	128,90	142,00	155,10
2242005	GAMMA	140,20	158,80	180,00	194,40	208,10
2344016	PEARSON-3	198,90	244,10	301,10	342,90	348,10

Tabela 03: Precipitações máximas diárias estimadas (mm) por isozona e período de retorno.
Fonte: Resultados obtidos pelo ALEA

Os resultados evidenciam diferenças expressivas entre os postos analisados. O Posto Vila Mambucaba (2344016) apresenta precipitações consideravelmente superiores aos demais, com valores que chegam a superar em mais de 120% os registros do Posto Porciúncula (2042027) para os mesmos períodos de retorno. Esse comportamento pode ser atribuído à influência orográfica da Serra da Bocaina e à proximidade com o oceano Atlântico, fatores que intensificam a precipitação na região sul fluminense. O Posto Fazenda São João (2242005), inserido na região serrana, apresenta valores intermediários, também influenciados pelo relevo acidentado da Serra dos Órgãos.

Equações IDF Geral

A partir das intensidades obtidas por meio da desagregação da precipitação diária segundo a metodologia de Taborga Torrico, procedeu-se à calibração dos parâmetros das equações IDF utilizando a ferramenta Solver do Excel. O ajuste foi realizado por meio da minimização do erro médio quadrático (EMQ) entre as intensidades observadas e estimadas.

A Tabela 04 apresenta os parâmetros das equações IDF gerais, ajustadas para representar simultaneamente todos os períodos de retorno analisados.

Posto Pluviométrico	a	b	c	d	Equação válida para
2042027 — Porciuncula	863,04	0,126	9,62	0,7390	Todos os TR
2242005 — Fazenda São João	1291,25	0,104	9,59	0,7389	Todos os TR
2344016 — Vila Mambucaba	1306,30	0,244	9,74	0,7392	Todos os TR

Tabela 04 – Parâmetros das equações IDF.
Fonte: Elaborado pelos autores

Equações IDF por Período de Retorno

Com o objetivo de avaliar a influência do período de retorno na calibração das equações IDF, procedeu-se ao ajuste individual dos parâmetros para cada tempo de recorrência analisado (TR = 5, 10, 25, 50 e 100 anos). Diferentemente da equação geral, na qual um único conjunto de parâmetros representa simultaneamente todos os períodos de retorno, nesta etapa foram ajustadas equações específicas para cada valor de TR, permitindo maior flexibilidade na representação das intensidades de chuva. A Tabela 05 apresenta os parâmetros ajustados para cada período de retorno.

Posto Pluviométrico	TR (anos)	Parâmetros da Equação			
		a	b	c	d
2042027	5	22,18	2,394	9,67	0,7458
	10	811,14	0,149	9,21	0,7395
	25	779,05	0,148	8,64	0,7318
	50	822,72	0,123	8,20	0,7256
	100	915,59	0,137	12,22	0,7557
2242005	5	22,67	2,606	9,67	0,7458
	10	1106,39	0,170	9,21	0,7397
	25	1023,16	0,169	8,64	0,7318
	50	1028,99	0,147	8,20	0,7256
	100	1106,10	0,160	12,22	0,7557
2344016	5	21,80	2,603	9,67	0,7458
	10	1554,01	0,211	9,21	0,7396
	25	1514,26	0,208	8,63	0,7316
	50	1461,94	0,203	8,19	0,7256
	100	1482,92	0,231	12,22	0,7557

Tabela 05 – Parâmetros das equações IDF por período de retorno.
Fonte: Elaborado pelos autores

Destaca-se que o parâmetro b para TR = 5 anos apresenta valores consideravelmente superiores aos demais períodos de retorno nos três postos analisados (variando entre 2,394 e 2,606, contra valores inferiores a 0,25 nos demais TR). Essa discrepância pode ser interpretada como um artefato da calibração para períodos de retorno mais curtos, onde a menor magnitude das precipitações estimadas exige ajuste distinto na forma da curva IDF, e merece atenção em aplicações práticas que envolvam TR = 5 anos.

Comparação entre as Equações IDF Geral e Específicas por Período de Retorno

Com o objetivo de avaliar as diferenças entre as abordagens de calibração, procedeu-se à comparação das intensidades estimadas pelas equações IDF geral e pelas equações ajustadas individualmente para cada período de retorno, considerando duração fixa de 10 minutos para padronização da análise. Os resultados são apresentados na Tabela 06.

	Posto Pluviométrico								
	2042027			2242005			2344016		
	I Geral (mm/h)	I Calibrada (mm/h)	Diferença (%)	I Geral (mm/h)	I Calibrada (mm/h)	Diferença (%)	I Geral (mm/h)	I Calibrada (mm/h)	Diferença (%)
TR=5 (anos)	117,21	113,29	3,46	169,52	163,01	3,99	213,38	155,94	36,83
TR=10 (anos)	127,94	128,49	-0,43	182,24	183,85	-0,88	252,70	283,90	-10,99
TR=25 (anos)	143,63	147,72	-2,77	200,51	207,24	-3,25	316,03	348,27	-9,26
TR=50 (anos)	156,78	162,01	-3,23	215,55	222,82	-3,26	374,27	394,84	-5,21
TR=100 (anos)	171,12	164,95	3,74	231,71	222,34	4,21	443,25	412,27	7,51

Tabela 06 – Diferença percentual entre as intensidades estimadas pelas equações IDF geral e por período de retorno.
Fonte: Elaborado pelos autores

A análise dos resultados revela um padrão consistente nos três postos: a equação geral tende a superestimar as intensidades para TR = 5 anos e TR = 100 anos, e a subestimá-las para os períodos de retorno intermediários (TR = 10, 25 e 50 anos). Esse comportamento sugere que a calibração com coeficientes únicos impõe um compromisso entre os extremos da série, resultando em ajuste menos preciso nas faixas de maior interesse para projetos de drenagem urbana.

O Posto Vila Mambucaba (2344016) apresentou as maiores discrepâncias entre as abordagens, com diferença de 36,83% para TR = 5 anos - valor expressivamente superior aos 3,46% e 3,99% registrados nos demais postos para o mesmo período de retorno. Esse comportamento está associado à maior variabilidade pluviométrica desse posto (CV = 0,465), que dificulta a representação simultânea de todos os períodos de retorno por um único conjunto de parâmetros.

Do ponto de vista prático, diferenças da ordem de 10 a 37% nas intensidades de projeto podem representar impacto significativo no dimensionamento de estruturas hidráulicas, como galerias de drenagem e bueiros, especialmente para períodos

de retorno curtos, frequentemente adotados em projetos de microdrenagem urbana. Esses resultados reforçam a recomendação de utilizar equações IDF ajustadas individualmente por período de retorno quando se busca maior precisão no dimensionamento.

Considerações Finais

O presente trabalho demonstrou que a abordagem de calibração adotada na obtenção das equações IDF exerce influência direta na precisão das intensidades de chuva estimadas. A análise de frequência das precipitações máximas diárias anuais, conduzida para três postos pluviométricos representativos das isozonas D, E e F do estado do Rio de Janeiro, evidenciou que a distribuição de probabilidade mais adequada varia entre os postos, reforçando a necessidade de avaliação individualizada e da aplicação de testes de aderência na seleção do modelo estatístico mais representativo para cada série histórica.

A desagregação das precipitações pelo método de Taborga Torrico e a subsequente calibração das equações IDF via minimização do erro médio quadrático revelaram diferenças expressivas entre a equação geral — com coeficientes únicos para todos os períodos de retorno — e as equações ajustadas individualmente para cada tempo de recorrência. A análise comparativa, realizada para a duração de 10 minutos, indicou que as maiores discrepâncias concentram-se nos períodos de retorno extremos, com diferenças de até 36,83% no Posto Vila Mambucaba (TR = 5 anos), posto que apresenta a maior variabilidade pluviométrica entre os analisados. Esse resultado reforça que a equação geral impõe um compromisso entre os extremos da série, resultando em subestimações ou superestimações que podem impactar diretamente o dimensionamento de obras hidráulicas.

Conclui-se, portanto, que equações IDF calibradas individualmente por período de retorno proporcionam maior precisão e são recomendadas em projetos que demandam rigor técnico elevado, especialmente aqueles envolvendo eventos extremos. A equação geral, por sua vez, mantém utilidade como ferramenta de estimativa preliminar, desde que suas limitações sejam reconhecidas e as incertezas associadas sejam devidamente consideradas no processo de dimensionamento. Destaca-se ainda que a comparação foi conduzida para uma única duração, o que constitui uma limitação do estudo e sugere cautela na generalização dos resultados para outras durações de interesse prático.

Por fim, ressalta-se a importância da regionalização hidrológica e da atualização contínua das séries pluviométricas frente ao contexto de mudanças climáticas, visando aprimorar a confiabilidade das equações IDF e a segurança das estruturas hidráulicas. Os resultados deste trabalho apontam para desdobramentos relevantes, entre os quais se destacam: a ampliação da análise para outras isozonas e regiões do Brasil; a comparação da metodologia de Taborga Torrico com abordagens alternativas; a investigação da estacionariedade das séries e o desenvolvimento de equações IDF não estacionárias; a aplicação das equações obtidas em modelos de drenagem urbana para avaliação do impacto no dimensionamento de estruturas.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: jan. 2024.

COLES, S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. London: Springer, 2001.

DRM-RJ – DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Zoneamento pluviométrico do Estado do Rio de Janeiro: atualização 2021. Niterói: DRM-RJ, 2021.

FILL, H. D. Análise de frequência de chuvas intensas: fundamentos e aplicações. In: SILVEIRA, A. L. L. et al. (org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/ABRH, 2011. cap. 9, p. 325-378.

GEORIO – FUNDAÇÃO GEO-RIO. Isozonas de precipitações intensas para o Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: GEORIO, 1996.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. Hidrologia estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

OLIVEIRA, S. C.; NOGUEIRA, C. D.; ANDRADE, S. B. Mudança do clima e padrões de precipitação para dimensionamento e verificação de obras hidráulicas. In: XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2020.

SILVEIRA, A. L. L. Chuvas intensas. In: SILVEIRA, A. L. L. et al. (org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/ABRH, 2016. p. 435-494.

TABORGA TORRICO, J. J. Chuvas de projeto em bacias hidrográficas. 1974.

TUCCI, C. E. M. (org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: ABRH/Ed. Universidade, 2009.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). International Journal of Climatology, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016.

TENDÊNCIAS DE PRECIPITAÇÃO E DIAS SECOS NA BACIA DO RIO FORMOSO (TO): IMPLICAÇÕES PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

1 Fabrício Kauan da Silva Santos; 2 Roberta Araújo e Silva; 3 Girlene Figueiredo Maciel.
1 Universidade Federal do Tocantins, e-mail: Fabricio.kauan@mail.uft.edu.br ; 2 Universidade Federal do Tocantins, e-mail: Roberta.as@uft.edu.br ; 3 Universidade Federal do Tocantins, e-mail:Maciel@mail.uft.edu.br

Palavras-chave: Tendência de precipitação; Dias secos; Eventos extremos.

Resumo

Este estudo teve como objetivo analisar as tendências do total precipitado e do número de dias secos (NDS) durante a estação chuvosa na Bacia do Rio Formoso, no período de 1969 a 2024, visando compreender alterações no regime hidrometeorológico e suas implicações para a gestão de recursos hídricos. Foram utilizados dados diários de precipitação provenientes de dez estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). A análise de tendência e magnitude do total precipitado e do NDS foi realizada por meio dos testes estatísticos não paramétricos de Mann-Kendall e Inclinação de Sen, aplicados tanto à estação chuvosa (setembro a maio) quanto à escala mensal. Os resultados indicaram que 60% das estações apresentaram tendência de redução do volume precipitado durante a estação chuvosa, enquanto o NDS apresentou tendência de aumento em 100% das estações, com incremento médio de 0,47 dias secos por ano. A análise mensal evidenciou variações intra-sazonais, com predominância de redução da precipitação no início e no final da estação chuvosa e aumento do NDS ao longo de todos os meses analisados, sendo observado, em determinados períodos, aumento simultâneo do total precipitado e do número de dias secos, indicando possível concentração temporal das chuvas. Esses resultados sugerem intensificação da irregularidade intra-sazonal da precipitação na região, com potencial aumento da frequência de eventos extremos, reforçando, no contexto da Bacia do Rio Formoso, a necessidade de monitoramento contínuo e adaptação das estratégias de gestão hídrica.

Introdução

A bacia do rio Formoso, situada no sudoeste do estado do Tocantins, tem sido palco de recorrentes intervenções institucionais na gestão de recursos hídricos, refletindo a intensificação das pressões antrópicas sobre a disponibilidade hídrica regional. Evidências desse cenário crítico manifestam-se na mediação judicial de conflitos e na suspensão de captações em períodos de estiagem (TJTO, 2024, 2025), além da interrupção histórica de outorgas durante crises de escassez, como registradas em 2016 e monitoradas em 2024, 2025 (NATURATINS, 2016). Embora tais intervenções institucionais busquem mitigar os impactos da crescente demanda por múltiplos usos da água, com destaque para a agricultura irrigada de larga escala, persiste uma lacuna teórica e prática sobre a forma como a variabilidade climática atual acelera e agrava esses episódios.

Sob a ótica da Engenharia Ambiental, o comprometimento das outorgas não advém isoladamente do aumento da demanda, mas da interação entre a pressão de uso e a intensificação da irregularidade intra-sazonal da precipitação. O aumento do Número de Dias Secos (NDS) em plena estação chuvosa invalida a premissa de regimes estacionários adotada no planejamento de infraestruturas, elevando a demanda hídrica instantânea e comprometendo parâmetros fundamentais de vazão de projeto e a concessão de direitos de uso da água nas últimas décadas (MILLY et al., 2008). Essa ruptura do paradigma da estacionariedade, conforme discutido amplamente na literatura técnica, indica que as variações climáticas e antrópicas impedem que o futuro hídrico seja previsto apenas por séries históricas passadas (FERREIRA et al., 2021). Consequentemente, as variações na distribuição temporal das chuvas influenciam o regime hidrometeorológico e reduzem a capacidade de autodepuração dos corpos hídricos.

A precipitação constitui um dos principais componentes do ciclo hidrológico, exercendo influência direta sobre a recarga de aquíferos e a manutenção das vazões (ROCHA et al., 2005). No bioma Cerrado, o regime pluviométrico apresenta elevada sazonalidade, com aproximadamente 90% da precipitação anual concentrada na estação chuvosa (SILVA et al., 2008). Tal característica reforça a importância da análise conjunta do volume total e da frequência de dias secos, uma vez que a distribuição temporal das chuvas condiciona a segurança hídrica regional.

Estudos recentes evidenciam alterações nesse regime em diferentes escalas. A nível mundial, Mehta et al. (2022) e Sudarsan et al. (2023) observaram variações na dinâmica temporal das chuvas na Índia. No Brasil, enquanto Belém apresenta tendências de aumento (LIRA et al., 2020), o Cerrado central e norte enfrenta reduções significativas (HOFMANN et al., 2023). No Tocantins, Santos, Silva e Maciel (2023) identificaram o encurtamento da estação chuvosa em Palmas, sugerindo mudanças estruturais no regime regional.

Considerando esse panorama, as alterações na dinâmica da precipitação em bacias estratégicas como a do rio Formoso podem ser acentuadas pela expansão agropecuária e supressão vegetal. Torna-se relevante, portanto, investigar a evolução histórica do total pluviométrico e do NDS para identificar implicações sobre a disponibilidade hídrica. Este estudo parte da hipótese de que a bacia apresenta uma tendência de redução no volume da estação chuvosa acoplada ao aumento da frequência de dias secos, fenômeno que contribui diretamente para a obsolescência de modelos de gestão baseados em regimes estacionários e para o agravamento dos eventos críticos de escassez.

Material e Métodos

Área de Estudo

A área de estudo compreende a Bacia do Rio Formoso (BRF), localizada na porção sudoeste do estado do Tocantins, inserida na bacia hidrográfica do rio Araguaia (Figura 1). A BRF possui área de drenagem de aproximadamente 21.328,57 km², correspondendo a cerca de 7,7% do território estadual (NATURATINS, 2019; FILHO et al., 2015), estando inserida no bioma Cerrado. A área abrange 18 municípios no estado do Tocantins, dos quais três apresentam apenas interseção marginal com os limites da bacia, conforme dados geoespaciais da Secretaria do Planejamento (TOCANTINS, 2012; TOCANTINS, 2023).

Coleta, organização e tratamento dos dados

Para a realização deste estudo, foram utilizados dados diários de precipitação provenientes de dez estações pluviométricas gerenciadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), obtidos por meio da plataforma HIDROWEB. A localização das estações e suas respectivas informações encontram-se apresentadas na Tabela 1 e na Figura 1.

A série histórica analisada compreendeu o período de 1969 a 2024, considerando-se exclusivamente os dados referentes à estação chuvosa, definida entre os meses de setembro e maio do ano subsequente.

O controle de qualidade dos dados foi realizado em três etapas: validação mensal, com exclusão de meses que apresentaram falhas iguais ou superiores a 10%; validação anual, com exclusão de anos com menos de oito meses válidos; e seleção das estações, mantendo-se apenas aquelas com, no **mínimo**, 30 anos de dados válidos na estação chuvosa, conforme recomendações da Organização Meteorológica Mundial (OMM).

Código	Coordenadas (Geográficas)		n (anos)	Bacia hidrográfica	Município
	Latitude	Longitude			
1048000	-10.7636	-48.9022	53	Rio Crixás	Fátima
1049001	-10.4411	-49.1792	42	Rio Pium	Pium
1149000	-11.3389	-49.2653	52	Rio Formoso	Dueré
1149001	-11.7972	-49.525	45	Rio Formoso	Formoso do Araguaia
1149002	-11.7372	-49.1361	53	Rio Santo Antônio	Gurupi
1249000	-12.4836	-49.1244	53	Rio Santa Tereza	Alvorada
1249001	-12.9311	-49.8294	52	Rio Formoso	Araguacu
1249002	-11.8394	-49.7717	44	Rio Formoso	Formoso do Araguaia
1249003	-12.0986	-49.9475	41	Rio Javaés	Sandolândia
1249004	-12.4181	-49.59	39	Rio Formoso	Sandolândia

Tabela 1: Caracterização das estações pluviométricas utilizadas no estudo. Fonte: Autor (2026)

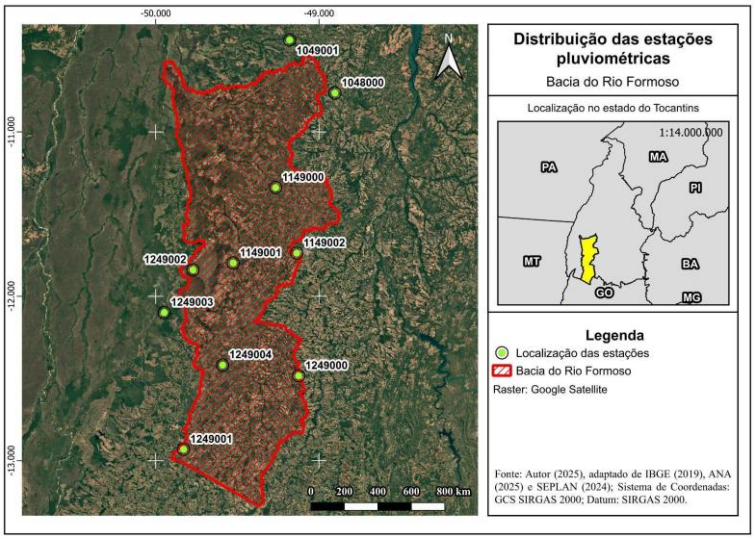


Figura 1: Mapa de distribuição espacial das estações pluviométricas. Fonte: Autor (2026)

Testes estatísticos

A análise de tendência foi realizada por meio do teste não paramétrico de Mann–Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975), enquanto a magnitude das tendências foi estimada pela inclinação de Sen (SEN, 1968). O teste de Mann–Kendall é amplamente recomendado para a detecção de tendências monotônicas estatisticamente significativas em séries temporais ambientais (IRANNEZHAD et al., 2016; KOCSIS et al., 2020).

As análises foram aplicadas tanto ao total de precipitação acumulada na estação chuvosa quanto ao número de dias secos no mesmo período, sendo considerado dia seco aquele com precipitação diária igual ou inferior a 1 mm. Adicionalmente, as análises foram conduzidas em escala mensal para o período de setembro a maio.

Resultados e Discussão

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise das séries temporais de precipitação durante a estação chuvosa nas 10 estações pluviométricas da BRF, evidenciando comportamentos distintos quanto às tendências. As séries analisadas apresentam, em média, 42 anos de observação, com precipitação média anual de 1.608,94 mm. Do total, 60% das estações (6 estações pluviométricas) apresentaram tendência negativa, indicando redução do volume precipitado nesse período, sendo que duas dessas tendências foram estatisticamente significativas. Duas dessas tendências (estações 1049001 e 1149001) foram estatisticamente significativas ($p < 0,05$), com magnitudes acumuladas de -384,94 mm e -378,69 mm, respectivamente. Ademais, a análise do número de dias secos (NDS), cuja média anual foi de 182,86 dias, revelou um padrão consistente de aumento em todas as estações avaliadas, com 100% das séries apresentando tendência positiva, das quais cinco foram estatisticamente significativas. A magnitude média dessas tendências indica um incremento de aproximadamente 0,47 dias secos por ano, evidenciando um aumento na frequência de períodos secos ao longo da estação chuvosa. Destaca-se a estação 1249003, que apresentou a maior taxa de aumento (1 dia seco/ano), resultando em um acréscimo acumulado de 34 dias secos. Esse dado evidencia a intensificação da irregularidade da precipitação, o que invalida as premissas de regimes estacionários adotadas no planejamento regional.

Código	Variáveis	n (anos)	Média Anual (mm)|(dia)	Mann-Kendall		Sen's (mm/ano)|(dia/ano)	Magnitude acumulada (mm)|(dia)
				S	Z		
1048000	PREC	47	1842,64	33	0,29	1,02	47,94
	NDS	47	165,96	145	1,32	0,23	10,81
1049001	PREC	38	1869,83	-183	**-2,29***	-10,13	-384,94
	NDS	38	176,63	105	1,31	0,24	9,12
1149000	PREC	48	1686,9	20	0,17	0,78	37,44
	NDS	48	181,4	78	0,69	0,09	4,32
1149001	PREC	39	1622,41	-219	**-2,64***	-9,71	-378,69
	NDS	39	168	258	**3,11***	0,68	26,52
1149002	PREC	48	1474,95	154	1,36	2,96	142,08
	NDS	48	191,71	580	**5,15***	0,82	39,36
1249000	PREC	47	1435,12	-135	-1,23	-3,19	-149,93
	NDS	47	186,53	488		0,71	33,37
1249001	PREC	48	1521,53	-20		-0,42	-20,16
	NDS	48	199,81	236	**2,09***	0,35	16,8
1249002	PREC	36	1570,91	-20	-0,26	-1,22	-43,92
	NDS	36	171,83	101	1,36	0,19	6,84
1249003	PREC	34	1577,01	-45	-0,65	-2,75	-93,5
	NDS	34	195,12	240	**3,54***	1	34
1249004	PREC	34	1488,08	125	1,84	6,91	234,94
	NDS	34	191,65	100	1,47	0,43	14,62

Tabela 2: Tendência e magnitude da precipitação e do número de dias secos durante a estação chuvosa.
Fonte: Autor (2026)
Nota: p < 0,05 foram considerados estatisticamente significativos.

A análise mensal (Tabela 3) revelou variações intra-sazonais críticas. Nos meses de setembro e maio, predominam tendências negativas na maioria das estações (100% e 90%, respectivamente), com magnitudes médias de -15,87 mm/mês e -12,11 mm/mês. Outubro apresentou o maior declínio, com magnitude média de -38,27 mm/mês. Esses dados sugerem um encurtamento da estação chuvosa na região, similar aos achados de Santos, Silva e Maciel (2024) para outras áreas do Tocantins.

Por outro lado, os meses de novembro e fevereiro apresentaram predomínio de tendências positivas (70% e 80%, respectivamente), com magnitudes médias de 16,18 mm/mês e 32,81 mm/mês, sugerindo aumento do total precipitado nesses períodos. Em março, também se observa predominância de tendências positivas (60%), porém com magnitude reduzida (0,09 mm/mês), indicando variações pouco expressivas. Já no mês de abril, as tendências apresentaram distribuição equilibrada entre valores positivos e negativos (50%), com baixa magnitude média (5,58 mm/mês), evidenciando variabilidade espacial pouco

definida. De forma semelhante, o mês de janeiro também apresentou comportamento equilibrado (50%), indicando heterogeneidade espacial das respostas pluviométricas ao longo da BRF.

Além disso, a análise mensal das tendências do número de dias secos (NDS) ao longo da estação chuvosa evidenciou predominância de tendências positivas na BRF, indicando aumento da frequência de dias sem precipitação. Nos meses de setembro, outubro e maio, observou-se que 100% das estações apresentaram tendência de aumento, com magnitudes médias de 1,48; 2,59 e 1,20 dias secos/mês, respectivamente, o que pode indicar um possível encurtamento da estação chuvosa na região. Esse comportamento é consistente com resultados observados em outras áreas do estado do Tocantins, como nos municípios de Palmas, Araguaína, Peixe e Porto Nacional, onde Santos, Silva e Maciel (2024) também identificaram encurtamento da estação chuvosa.

Nos meses de novembro, dezembro e março, a maioria das estações apresentou tendência positiva (80%, 90% e 90%, respectivamente), com magnitudes médias de 1,24; 2,82 e 2,65 dias secos/mês, destacando-se dezembro como o mês de maior magnitude de tendência, associado à segunda maior redução do volume precipitado. Em janeiro, fevereiro e abril, embora o predomínio de tendências positivas tenha sido menor (70%), as magnitudes permaneceram positivas (1,64; 0,91 e 1,73 dias secos/mês), indicando aumento consistente do número de dias secos ao longo de toda a estação chuvosa. De forma geral, os nove meses analisados apresentaram tendência positiva para o NDS, com magnitudes variando de 0,91 (fevereiro) a 2,82 dias secos/mês (dezembro). Ressalta-se, contudo, que esse aumento nem sempre esteve associado à redução do volume precipitado, como observado nos meses de novembro, janeiro, fevereiro, março e abril, que apresentaram aumento simultâneo do número de dias secos e do total precipitado, com magnitudes variando de 0,09 mm/mês (março) a 32,81 mm/mês (fevereiro).

Ademais, na tabela 3 destaca-se o comportamento da estação 1149002, localizada no município de Gurupi (TO), que apresentou, no segundo trimestre analisado, tendências positivas de precipitação, com magnitude média de 70,45 mm/mês, associadas ao aumento no número de dias secos, com magnitude média de 5,21 dias/mês. Esse padrão sugere uma possível concentração do volume precipitado, o que pode favorecer a ocorrência de eventos extremos, como chuvas intensas, alagamentos, enxurradas e sobrecarga do sistema de drenagem urbana. Tal interpretação é reforçada por registros recorrentes de impactos associados a chuvas intensas no município, incluindo episódios de alagamentos, enxurradas e danos à infraestrutura urbana, amplamente reportados em diferentes anos, evidenciando que esses eventos não são casos isolados (SECOM-TO, 2023; G1 TOCANTINS, 2022; G1 TOCANTINS, 2021; PREFEITURA DE GURUPI, 2026).

Código	Variáveis	Testes estatístico	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI
1048000	PREC	MK	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1
		Sen's	-15,51	-67,62	6,11	17,86	100,58	24,84	20,21	-11,28	-16,92
	NDS	MK	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1
		Sen's	1,88	2,76	0	0	-1,41	0	0	0	2,35
1049001	PREC	MK	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1
		Sen's	-28,5	-55,1	-152,6	-100,3	1,52	26,64	0,76	-11,78	-44,84
	NDS	MK	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1
		Sen's	1,52	3,8	2,88	1,9	0	0	0	0	1,9
1149000	PREC	MK	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1
		Sen's	-8,16	-51,36	89,28	-6,24	60,96	12,88	17,76	-10,08	-6,72
	NDS	MK	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1
		Sen's	1,92	2,4	0	1,44	0	0	0	0	0
1149001	PREC	MK	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1
		Sen's	-14,44	-44,07	-24,96	-86,97	-83,46	-9,12	-33,82	1,56	-25,35
	NDS	MK	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		Sen's	1,14	0	0	4,68	2,73	1,9	3,42	1,95	3,12
1149002	PREC	MK	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
		Sen's	-2,88	-51,36	-0,48	65,28	72,48	73,6	10,56	21,12	0,94
	NDS	MK	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		Sen's	1,44	3,36	4,8	5,76	5,28	4,6	6,24	3,84	0
1249000	PREC	MK	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1
		Sen's	-0,47	-19,74	33,37	-26,32	-0,94	-28,52	10,34	33,37	-12,22
	NDS	MK	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		Sen's	0,94	5,17	2,35	5,64	4,23	4,14	4,7	3,76	1,88
1249001	PREC	MK	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
		Sen's	-20,68	-22,08	14,4	62,04	-12,22	52,8	-17,28	-23,04	-7,68
	NDS	MK	1	1	1	-1	1	1	1	1	1
		Sen's	1,88	2,88	0	0	2,82	0	1,44	0,96	0
124900	PREC	MK	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1

2	NDS	Sen's	-22,68	-42,84	21	-11,52	-12,95	65,16	-8,64	46,44	-4,2
		MK	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1
		Sen's	1,08	1,8	0	0,36	0	-2,88	1,8	0	1,4
1249003	PREC	MK	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1
		Sen's	-16,5	-22,78	39,44	-93,5	-29,58	37,4	-10,2	10,88	0
	NDS	MK	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		Sen's	1,65	2,38	3,4	5,78	3,74	2,38	4,76	3,4	0
1249004	PREC	MK	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1
		Sen's	-28,9	-5,78	136,29	-12,54	37,06	72,42	11,2	-1,36	-4,08
	NDS	MK	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1
		Sen's	1,36	1,36	-0,99	2,64	-1,02	-1,02	4,16	3,4	1,36

Tabela 3: Tendência mensal da precipitação e do número de dias secos na estação chuvosa em estações pluviométricas da ANA na bacia do rio Formoso e em suas áreas adjacentes.
Fonte: Autor (2026)

Dessa forma, os resultados indicam intensificação da irregularidade intra-sazonal das chuvas na BRF, caracterizada pelo aumento do número de dias secos e pela redistribuição temporal da precipitação, podendo favorecer a ocorrência de eventos mais intensos na região. Ademais, conforme Lira et al. (2020) a variabilidade da precipitação influencia diretamente o balanço hídrico e a dinâmica dos sistemas hidrológicos. No contexto da Bacia do Rio Formoso, esses resultados ganham relevância diante do uso intensivo dos recursos hídricos pelo setor agropecuário, associado à redução das vazões na região (BORGES SOBRINHO et al., 2020), e à recorrência de crises hídricas marcadas por conflitos pelo uso da água, intervenções judiciais e fragilidades na governança dos recursos hídricos (BORGES et al., 2023). Assim, os resultados indicam que as alterações no regime pluviométrico não são pontuais, refletindo mudanças na dinâmica hidrometeorológica regional e demandando monitoramento contínuo e adaptação da gestão dos recursos hídricos.

Considerações Finais

Os resultados evidenciam tendências distintas no total precipitado e no número de dias secos. Observou-se predominância de redução do volume precipitado em parte das estações, associada ao aumento generalizado do NDS, indicando alterações no regime pluviométrico com indícios de encurtamento da estação chuvosa.

A análise conjunta indica que essas mudanças não ocorrem de forma uniforme. O aumento simultâneo dos dias secos e do volume precipitado em determinados períodos sugere uma redistribuição temporal das chuvas, com concentração em eventos mais intensos e maior frequência de extremos. Essas alterações comprometem critérios clássicos de dimensionamento hidráulico baseados na hipótese de estacionariedade, exigindo a revisão de parâmetros de projeto em sistemas de abastecimento e irrigação. Nesse contexto, destaca-se a necessidade de incorporar a não estacionariedade climática e as pressões antrópicas nos processos de planejamento e gestão de recursos hídricos, visando maior resiliência frente aos cenários de variabilidade e mudança climática na bacia do rio Formoso.

Agradecimentos

Referências Bibliográficas

BORGES SOBRINHO, A. et al. **Agropecuária e comportamento hídrico: sub-bacia do rio Formoso**. In: SCAPIN, E.; ALBIERI, L.; NAVAL, L. P. (org.). Agropecuária e meio ambiente. Palmas: EDUFT, 2020.

BORGES, M. S. et al. **Conflitos e contradições na governança da Bacia do Rio Formoso – Tocantins – Brasil**. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, v. 19, n. 3, 2023. DOI: https://doi.org/10.54399/rbgdr.v19i3.6607 . Acesso em: 12 abr. 2026.

FERREIRA, Fernanda L. V. et al. **Time series trends of streamflow and rainfall in the Santo Antônio River Basin, Brazil**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 41, n. 1, p. 47–55, jan. 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n1p47-55/2021

FILHO, N. L. et al. **Characterization of water users in the Rio Formoso/TO watershed**. Environmental Engineering: Research and Technology, v. 12, n. 2, 2015.

G1 TOCANTINS. **Chuva forte derruba muros, alaga ruas e deixa casas cheias de lama em Gurupi. 2021**. Disponível em: https://g1.globo.com/to/tocantins/noticia/2021/02/10/chuva-forte-derruba-muros-alaga-ruas-e-deixa-casas-cheias-de-lama-em-gurupi.ghtml . Acesso em: 9 abr. 2026.

G1 TOCANTINS. **Com chuva intensa, avenidas viram rios e motoristas têm prejuízos com veículos em Gurupi**. 2022. Disponível em: https://g1.globo.com/to/tocantins/noticia/2022/12/14/com-chuva-intensa-avenidas-viram-rios-e-motoristas-tem-prejuizos-com-veiculos-em-gurupi.ghtml
. Acesso em: 9 abr. 2026.

GURUPI. **Prefeitura Municipal. Prefeitura de Gurupi intensifica limpeza e desobstrução de vias após fortes chuvas**. 2026. Disponível em: https://gurupi.to.gov.br/2026/02/prefeitura-de-gurupi-intensifica-limpeza-e-desobstrucao-de-vias-apos-fortes-chuvas-nesta-segunda-feira-02/
. Acesso em: 9 abr. 2026.

HOFMANN, G. S. et al. **Changes in atmospheric circulation and evapotranspiration are reducing rainfall in the Brazilian Cerrado**. Scientific Reports, v. 13, art. 2945, 2023.

IRANNEZHAD, M. et al. **Century-long variability and trends in daily precipitation characteristics at three Finnish stations**. Advances in Climate Change Research, v. 7, p. 54–69, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.accre.2016.04.004.

KENDALL, M. G. **Rank correlation measures**. London: Charles Griffin, 1975.

KOCSIS, T.; SZÉKELY, I. K.; ANDA, A. **Homogeneity tests and non-parametric analyses of tendencies in precipitation time series in Keszthely, Western Hungary**. Theoretical and Applied Climatology, v. 139, p. 849–859, 2020. DOI: http://doi.org/10.1007/s00704-019-03014-4
.

LIRA, B. R. P. et al. **Identificação de homogeneidade, tendência e magnitude da precipitação em Belém (Pará) entre 1968 e 2018**. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, v. 43, n. 4, p. 426–439, 2020.

MANN, H. B. **Nonparametric tests against trend**. Econometrica, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945.

MEHTA, P. et al. **Variability and time series trend analysis of rainfall in the mid-hill sub humid zone: a case study of Nauni**. Environmental Science and Pollution Research, v. 29, p. 80466–80476, 2022.

MILLY P.C.D., Betancourt J, Falkenmark M, Hirsch RM, Kundzewicz ZW, Lettenmaier DP. **Stationarity Is Dead: Whither Water Management?**. Science 319(5863):573-574, 2008. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1151915

NATURATINS. **Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Formoso**. 2019. Disponível em: https://naturatins.to.gov.br
. Acesso em: 12 abr. 2026.

ROCHA, H. R. et al. **Caracterização física do Cerrado pé-de-gigante e uso das terras na região**. In: PIVELLO, V. R.; VARANDA, E. M. (org.). O Cerrado do pé-de-gigante. São Paulo: SMA, 2005.

SANTOS, V. C.; SILVA, R. A.; MACIEL, G. F. **Avaliação de tendência do início, fim, duração e total de precipitação da estação chuvosa de Palmas - TO**. Revista Desafios, 2023.

SANTOS, V. C.; SILVA, R. A.; MACIEL, G. F. **Detecção de tendências na estação chuvosa do estado do Tocantins**. Revista Desafios, v. 11, n. 3, 2024.

SECOM (TOCANTINS). **Com forte chuva em Gurupi, bombeiros militares apoiam moradores atingidos por enxurrada**. 2023.

SEN, P. K. **Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau**. Journal of the American Statistical Association, 1968.

SILVA, F. M.; ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, B. A. **Caracterização climática do Bioma Cerrado**. In: Cerrado: ecologia e flora. Brasília: Embrapa, 2008.

Sudarsan, G. Lasitha, A. **Rainfall Trend analysis using Mann-Kendall and Sen's slope test estimation- A case study**. E3S Web of Conferences v.405, n.04013, p. 1-8, 2023.

TOCANTINS. Instituto Natureza do Tocantins (NATURATINS). **Naturatins suspende a outorga de recursos hídricos**. 2016.

TOCANTINS. Secretaria do Planejamento e Orçamento (SEPLAN). **Base cartográfica do Estado do Tocantins: bacias hidrográficas**. 2012.

TOCANTINS. Secretaria do Planejamento e Orçamento (SEPLAN). **Base cartográfica do Estado do Tocantins: limite municipal 2022 A**. 2023.

TRIBUNAL DE JUSTIÇA DO TOCANTINS (TJTO). **Captação de água na bacia do rio Formoso no período de estiagem está suspensa por tempo indeterminado a partir de 2025**. 2024. Disponível em: https://www.tjto.jus.br. Acesso em: 26 mar. 2026.

TRIBUNAL DE JUSTIÇA DO TOCANTINS (TJTO). **Justiça suspende outorgas para captação de água na estiagem e mantém multas por irregularidades na bacia do rio Formoso**. 2025. Disponível em: https://www.tjto.jus.br/comunicacao/noticias/justica-suspende-outorgas-para-captacao-de-agua-na-estiagem-e-mantem-multas-por-irregularidades-na-bacia-do-rio-formoso-2. Acesso em: 26 mar. 2026.

PONDERAÇÃO DE INDICADORES DE RESILIÊNCIA EM REDES DE TRANSPORTES UTILIZANDO *SOCIAL CHOICE FUNCTIONS*

1 Alexandre Grings, 1 Giovana Denardi Parcianello, 1 Vanessa Teresinha Alves, 1 Alejandro Ruiz-Padillo
1 Laboratório de Mobilidade e Logística, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, Brasil,
e-mail: lamot@ufsm.br

Palavras-chave: Análise Multicritério; Níveis estratégicos; Painel de Especialistas.

Resumo

Nos últimos anos, as mudanças climáticas têm contribuído para o aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos em diversas regiões do mundo, resultando em impactos significativos nas esferas econômica, social e ambiental. Nesse contexto, torna-se urgente a adoção de estratégias integradas de adaptação das redes de transporte, tendo em vista a mitigação de seus impactos e o aumento da resiliência desses sistemas. Diante disso, esta pesquisa avalia indicadores de resiliência identificados na literatura por meio da aplicação da Técnica de Painel de Especialistas e das Funções de Escolha Social (SCF). Busca-se, assim, analisar a importância relativa desses indicadores a partir de uma perspectiva multidimensional da resiliência, integrando aspectos técnicos, institucionais e sociais. Para tanto, os especialistas foram organizados em vários painéis envolvendo profissionais, técnicos e pesquisadores dos setores acadêmico, público e privado, cujas percepções foram analisadas em quatro níveis estratégicos (gerencial, técnico, operacional e de usuários). Ademais, foram aplicadas quatro SCF com diferentes metodologias de ponderação, sendo elas: Borda, Dowdall, Copeland Modificado e Schulze. Como resultado, as comparações estatísticas entre os métodos empregados e entre os painéis de especialistas demonstraram a inexistência de diferenças significativas, permitindo a consolidação de um peso único para cada indicador avaliado. Sendo assim, a ponderação global indicou que a Robustez é o indicador mais relevante (17%), seguida pela Conectividade (12%), Flexibilidade (11%) e Acessibilidade (11%), enquanto Nível de Serviço (7%) e Multimodalidade (6%) apresentaram menor relevância relativa. Do ponto de vista teórico e aplicado, a contribuição do estudo se baseia em um conjunto inédito de pesos de indicadores referentes à resiliência de redes de transportes terrestres, com uma abordagem integrada que articula desempenho funcional, topologia de rede e aspectos operacionais, fortalecendo a mensuração quantitativa da resiliência.

Introdução

A resiliência em redes de transporte tem se consolidado como um tema central no planejamento e na gestão de infraestruturas críticas, especialmente diante do aumento da frequência e intensidade de eventos disruptivos, sobretudo daqueles associados às mudanças climáticas. Nesse contexto, a capacidade de resistir, absorver impactos, recuperar-se e adaptar-se é fundamental para garantir a continuidade dos serviços e o bem-estar socioeconômico das comunidades dependentes dessas infraestruturas (Twumasi-Boakye e Sobanjo, 2019; Esmalian *et al*., 2022; Kim *et al*., 2023; Pant *et al*., 2023). Assim, torna-se necessário incorporar medidas de resiliência nas ações de planejamento, considerando as particularidades locais que influenciam o desempenho dessas redes (Cirolini *et al*., 2024).

A avaliação da resiliência, entretanto, representa um desafio significativo, especialmente pela dificuldade de mensurar seus efeitos de forma abrangente. Isso porque, trata-se de um conceito multidimensional, que envolve diferentes perspectivas, sendo elas: operacional (relativa à resposta imediata a disrupções), técnica (com foco no desempenho e na manutenção), gerencial (referente a diretrizes e alocação de recursos) e de usuário (enfatizando a qualidade e a confiabilidade do serviço) (Whitman *et al*., 2017; Bi *et al*., 2023). Ainda, a importância atribuída aos indicadores de resiliência varia conforme o setor de atuação dos profissionais que avaliam a rede de transportes. Por um lado, no setor acadêmico, predomina o interesse em modelos conceituais e metodológicos; no público, a ênfase recai sobre políticas e planejamento; e no privado, na continuidade operacional e na redução de riscos econômicos (Bi *et al*., 2023; Cordero *et al*., 2024).

Diante da ausência de consenso metodológico que considere a natureza multidimensional da resiliência, integrando aspectos técnicos, institucionais e sociais, torna-se fundamental estabelecer medidas que permitam ponderar a importância relativa de indicadores de resiliência. Essa necessidade é ainda mais evidente no âmbito brasileiro devido a intensificação de eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e inundações severas, percebida nos últimos anos. Esses fenômenos atingiram proporções críticas em 2023 e 2024, provocando graves prejuízos econômicos, sociais e ambientais em várias regiões do país (Cirolini *et al*., 2024).

Nesse cenário, o estudo propõe avaliar indicadores de resiliência identificados na literatura por meio da Técnica de Painel de Especialistas, combinada a diferentes Funções de Escolha Social. A partir disso, busca-se compreender a relevância relativa desses indicadores sob uma abordagem multidimensional da resiliência. O uso combinado desses métodos confere caráter inovador à análise, ao transpor fundamentos da decisão coletiva para a ponderação de indicadores de resiliência, possibilitando representar de forma mais equilibrada as percepções dos diferentes setores. Por fim, os resultados contribuem tanto para o avanço teórico quanto para a prática na gestão da resiliência em transportes, ao oferecer uma estrutura quantitativa para hierarquização de indicadores e apoiar a tomada de decisão, especialmente na priorização de investimentos e políticas.

Referencial Teórico

Resiliência em Redes de Transporte

A resiliência em redes de transporte consolidou-se como um conceito fundamental para o planejamento e a gestão de infraestruturas, especialmente diante do aumento de eventos disruptivos, como desastres naturais, falhas tecnológicas e crises socioeconômicas (Kim *et al*., 2023; Pant *et al*., 2023). Nesse contexto, a resiliência refere-se à capacidade dos sistemas de transporte de resistir a perturbações, absorver impactos, recuperar-se de forma eficiente e adaptar-se a novas condições, garantindo a continuidade da mobilidade, da logística e do funcionamento socioeconômico. Mais do que retornar ao estado anterior, a resiliência envolve um processo dinâmico de adaptação e transformação que permite manter o desempenho essencial mesmo sob condições críticas (Liu *et al*., 2021), incorporando princípios como flexibilidade, redundância e planejamento adaptativo, os quais são essenciais para a sustentabilidade de longo prazo das infraestruturas (Twumasi-Boakye e Sobanjo, 2019; Adey *et al*., 2021). Assim, a resiliência pode ser mensurada pela diferença entre o nível de desempenho em condições normais e aquele disponível durante uma crise, considerando também os custos associados à mitigação e à recuperação (Adey *et al*., 2021).

Nesse contexto, o fortalecimento da resiliência depende da integração entre práticas de engenharia e gestão que possibilitem antecipar riscos e responder rapidamente a eventos adversos. Com isso, destacam-se o uso de tecnologias de monitoramento, o desenvolvimento de sistemas redundantes e a adoção de estratégias de recuperação eficientes diante de eventos extremos, como inundações e deslizamentos (Yin *et al*., 2023). Esses eventos provocam impactos significativos nas redes, incluindo interrupções, atrasos e cancelamentos, afetando a fluidez da mobilidade e da logística. Além disso, comprometem o acesso a serviços essenciais, operações de emergência e atividades econômicas, gerando prejuízos que vão desde custos diretos de reparo até perdas de produtividade associadas à redução da conectividade e ao aumento do tempo de resposta operacional (Twumasi-Boakye e Sobanjo, 2019; Yin *et al*., 2023). Diante dessa complexidade, a literatura enfatiza a necessidade de uma abordagem sistêmica para a análise da resiliência, considerando a interdependência entre elementos físicos, operacionais e organizacionais (Cordero *et al*., 2024).

Indicadores de Resiliência em Redes de Transporte

A literatura especializada sobre o tema destaca a existência de indicadores para a avaliação da resiliência em redes de transporte, os quais atuam de forma interdependente, compondo um arcabouço teórico que integra dimensões estruturais, funcionais e adaptativas da resiliência em sistemas de transporte (Bi *et al*., 2023). Assim, a robustez refere-se à capacidade da rede de suportar perturbações sem perda significativa de desempenho, estando diretamente associada à resistência física e operacional dos seus componentes (Faturechi e Miller-Hooks, 2015). Já a conectividade expressa o grau de interligação entre nós e rotas, sendo essencial para garantir a continuidade dos fluxos mesmo em caso de falhas pontuais (Faturechi e Miller-Hooks, 2015; Dong *et al*., 2020; Zhao e Zhang, 2020).

Por sua vez, a flexibilidade refere-se à habilidade de reconfigurar rotas e redistribuir fluxos rapidamente (Mostafavi e Inman, 2016; Thacker *et al*., 2017; Whitman *et al*., 2017; Gangwal e Dong, 2022), enquanto a acessibilidade garante que os usuários continuem alcançando seus destinos mesmo em cenários adversos (Twumasi-Boakye e Sobanjo, 2018; Kim *et al*., 2023). Outro indicador de rede que influencia na resiliência é a capacidade que representa o volume máximo de tráfego que uma rede pode suportar antes que seu desempenho se degrade (Cordero *et al*., 2024), enquanto o fluxo de tráfego indica a utilização efetiva dessa capacidade, refletindo o comportamento dos deslocamentos ao longo do sistema e indicando o equilíbrio entre oferta e demanda (Bi *et al*., 2023). O tempo de viagem, por sua vez, sintetiza o desempenho percebido pelos usuários, refletindo atrasos, desvios e perdas de eficiência durante situações normais ou de crise (Adey *et al*., 2021), sendo altamente sensível a variações decorrentes de disrupções. Associado a ele, o nível de serviço complementa essa análise ao incorporar critérios de qualidade, como conforto, velocidade e confiabilidade, permitindo avaliar de forma mais abrangente a experiência do usuário e a eficiência operacional da rede (Adey *et al*., 2021).

De forma complementar, a multimodalidade amplia essa capacidade de reação do sistema ao integrar diferentes modos de transporte, permitindo alternativas de deslocamento e aumentando a resiliência do sistema como um todo (Zhao e Zhang, 2020). Por fim, a redundância reforça e amplia a resiliência funcional do sistema ao oferecer caminhos ou componentes alternativos quando partes da rede se tornam inoperantes (Twumasi-Boakye e Sobanjo, 2019; Lu *et al*., 2022; Esmalian *et al*., 2022). Em conjunto, esses dez indicadores oferecem uma visão sistêmica e integrada da resiliência, evidenciando que sua efetividade depende do equilíbrio entre resistência estrutural, desempenho operacional e capacidade adaptativa.

Funções de Escolha Social (Social Choice Functions – SCF)

As Funções de Escolha Social (SCF) têm como propósito transformar preferências individuais em uma decisão coletiva coerente, sintetizando diferentes opiniões em uma ordenação comum de alternativas (Arrow, 1951). Essa abordagem torna-se especialmente valiosa em cenários de tomada de decisão multicritério (MCDM), onde diversas dimensões de avaliação coexistem e precisam ser ponderadas para refletir o consenso do grupo (Nurmi, 2010; Zhang, 2020). No campo dos transportes, as SCF têm sido aplicadas à análise da mobilidade, acessibilidade e do transporte público, permitindo a conciliação de interesses de múltiplos stakeholders a partir de métricas como custo, tempo e modo de viagem, impacto ambiental e qualidade da infraestrutura (Ruiz-Padillo *et al*., 2016; Kita *et al*., 2024). Nesse sentido, sua aplicação à gestão da resiliência em redes de transporte configura-se como inovadora, pois não há estudos que explorem diretamente seu uso nessa avaliação.

Assim, métodos como Borda (Nurmi, 2010), Copeland Modificado (Green-Armytage, 2004), Dowdall (Balinski e Laraki, 2011) e Schulze (Schulze, 2011) permitem estruturar rankings e converter preferências qualitativas em pesos quantitativos, por meio de matrizes de classificação, comparação e preferência. Essa abordagem cria uma ponte entre análise

qualitativa e modelagem quantitativa, garantindo maior rigor e transparência ao processo decisório. Portanto, as SCF se consolidam como uma ferramenta robusta para apoiar a priorização de indicadores de resiliência, preservando a diversidade de opiniões e fortalecendo a formulação de estratégias mais equilibradas e fundamentadas.

Metodologia

A metodologia deste estudo é composta por quatro etapas sequenciais que buscam uma análise estruturada da resiliência em redes de transporte diante de eventos adversos. Na primeira etapa, a revisão bibliográfica permitiu selecionar os indicadores mais amplamente citados na literatura sobre resiliência em redes de transporte. Esses indicadores foram organizados em quatro níveis estratégicos, considerando sua natureza e interação com diferentes dimensões do sistema de transporte. Essa estruturação permitiu compreender como cada indicador se manifesta em diferentes níveis de atuação e quais dimensões da rede são mais sensíveis à ocorrência de eventos disruptivos.

Na segunda etapa, a coleta de dados para aplicação das técnicas de ponderação foi realizada com a participação de especialistas, organizados como votantes conforme a técnica de Painel de Especialistas (*Expert Panel Technique* – EPT) (Gambatese *et al*., 2008). As opiniões foram obtidas por meio de questionário eletrônico, aplicado entre junho e julho de 2025, garantindo anonimato e independência nas respostas. Cada especialista atribuiu notas de 1 a 10 aos indicadores de resiliência em redes de transporte, em cada nível estratégico definido na etapa 1, conforme sua relevância, sendo 1 a menor e 10 a maior importância. Antes da aplicação final, realizou-se um teste piloto para verificar clareza, coerência e aplicabilidade do instrumento. Os especialistas foram organizados em três grupos (setor público, privado e académico), assegurando-se um mínimo de 10 participantes por setor, a fim de garantir equilíbrio, representatividade e heterogeneidade da amostra (Turoff, 1970).

Após a coleta dos dados, os indicadores de resiliência foram ponderados por meio de Funções de Escolha Social (SCF), a partir das matrizes de classificação, comparação e preferência (Ruiz-Padillo *et al.,* 2016). Dentre as diferentes SCF, foram adotados os métodos Borda, Dowdall, Copeland Modificado e Schulze, pela sua simplicidade e ampla utilização na literatura. No método de Borda, com base na matriz de classificação $M \in \mathbb{R}^{m \times n}$, onde m é o número de especialistas, n o número de indicadores e m_{ij} representa a nota atribuída pelo especialista i ao indicador j, a pontuação total é dada pela Equação 01 e os pesos relativos pela Equação 02, admitindo empates e refletindo a relevância relativa dos indicadores (Nurmi, 2010; Zhang, 2020).

$$P_j = \sum_{i=1}^{m} m_{ij} \quad (01)$$

$$w_j = \frac{P_j}{\sum_{k=1}^{n} P_k} \quad (02)$$

No método Dowdall, também com base em $M \in \mathbb{R}^{m \times n}$, as posições atribuídas (1 = maior prioridade, n = menor) são convertidas em valores inversos, sendo a pontuação expressa pela Equação 03 e os pesos pela Equação 04, o que suaviza diferenças entre alternativas melhores classificadas (Balinski e Laraki, 2011).

$$D_j = \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{m_{ij}} \quad (03)$$

$$w_j = \frac{D_j}{\sum_{k=1}^{n} D_k} \quad (04)$$

Já o método de Copeland Modificado utiliza a matriz de preferência $P \in \{-1,0,1\}^{n \times n}$, sendo p_{ij}=1 se o indicador o_i for preferido a o_j (ou seja, $c_{ij} > m/2$); p_{ij}=−1se o_j for preferido a o_i ($c_{ij} < m/2$); e p_{ij}=0 em caso de empate ($c_{ij} = m/2$). Assim, a pontuação de Copeland C_i do indicador o_i é dada pela Equação 05 com normalização expressa na Equação 06, permitindo obter pesos a partir das vitórias e derrotas (Nurmi, 2010).

$$C_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^{m} P_{ij} \quad (05)$$

$$w_i = \frac{C_i - \min(C_i)}{\max(C_i) - \min(C_i)} \quad (06)$$

Finalmente, o método de Schulze baseia-se na matriz de comparação $C \in \mathbb{R}^{n \times n}$, em que o elemento c_{ij} representa a força direta da vitória do indicador o_i sobre o_j calculada pela Equação 07. Em seguida, calcula-se a força do caminho mais forte $q(i,j)$ de i até j, de forma recursiva, utilizando a Equação 08. Isso significa que, para cada par (i,j), busca-se o caminho onde o elo mais fraco ainda é o mais forte possível (princípio de minimax). O indicador o_i será considerado preferido a o_j se $q\,(i,j) > q\,(j,i)$. Com base nessas comparações, gera-se uma ordem de preferência global a partir do qual se atribuem escores decrescentes que, normalizados, geram os pesos relativos calculados pela Equação 09, onde s_i representa o escore atribuído ao indicador i, conforme sua posição final.

$$d(i,j) = \begin{cases} c_{ij}, \ se\ c_{ij} > c_{ji} \\ 0, \ caso\ contrário \end{cases} \quad (07)$$

$$q(i,j) = \max_{i=i_0,i_1,\dots,i_k=j} \min\{d(i_0,i_1), d(i_1,i_2), \dots, d(i_{k-1},i_k)\} \quad (08)$$

$$w_i = \frac{s_i}{\sum_{k=1}^{n} s_k} \quad (09)$$

As SCF foram aplicadas por nível estratégico e por grupo (público, privado e acadêmico), sendo as diferenças avaliadas por testes de Shapiro–Wilk e Levene, que indicaram o uso do teste não paramétrico de Kruskal–Wallis (Hair *et al*., 2009). Finalmente, a quarta etapa do estudo realizou a agregação dos conjuntos de pesos obtidos na fase anterior, com o objetivo de obter uma visão consolidada sobre a relevância dos indicadores de resiliência. Este conjunto final de pesos serviu como base das propostas de atuações a partir da avaliação global da resiliência de redes de transportes.

Resultados e discussões

Inicialmente, a partir da revisão de literatura foram identificados os 10 indicadores mais relevantes que foram incluídos nas análises, sendo os seguinte: Robustez (resistência física e estrutural da rede); Redundância (existência de rotas ou modos alternativos); Conectividade (grau de interligação entre os nós da rede); Flexibilidade (capacidade de adaptação a condições de crise); Acessibilidade (facilidade de acesso dos usuários aos serviços); Capacidade (volume máximo de tráfego que a rede suporta); Nível de Serviço (LOS) (qualidade percebida pelos usuários); Tempo de Viagem (eficiência operacional); Multimodalidade (integração entre diferentes modos de transporte) e Fluxo de Tráfego (medida da intensidade do uso da rede). Diante da identificação dos indicadores, como mostrado anteriormente, os mesmos foram estruturados de acordo com as características destes em cada um dos quatro níveis estratégicos, de acordo com a Figura 01.



Figura 01: Níveis estratégicos.
Fonte: elaboração própria

Já na etapa 2, os especialistas que formaram os painéis para coleta de dados foram representantes de órgãos públicos, empresas privadas e públicas, instituições de ensino e centros de pesquisa do Brasil, relacionados ao planejamento e engenharia viária. Esta organização priorizou a diversidade e a experiência relevante ao tema, possibilitando uma visão ampla e multidisciplinar sobre o problema de análise (Mahboubi *et al*., 2015). Um total de 44 profissionais, técnicos e pesquisadores responderam ao questionário, com uma distribuição equilibrada das áreas de atuação: acadêmica (34,1%), pública (34,1%) e privada (31,8%).

Com isso, as 4 SCF selecionadas foram aplicadas aos dados coletados dos especialistas e, em sequência foram realizados testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Levene), os quais, respectivamente, apresentaram p-valores de 0,02888 e de 0,0351, indicando a rejeição da hipótese de normalidade e de homocedasticidade. Diante disso, aplicou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis tanto à comparação entre os resultados das quatro SCF (Borda, Dowdall, Copeland modificado e Schulze) no painel completo, quanto às comparações entre os grupos de especialistas (acadêmico, privado e público). Estes testes revelaram que não existem diferenças estatisticamente significativas em todas as comparações, uma vez que os p-valores foram superiores a 0,05, permitindo, portanto, o cálculo de valores médios de pesos para indicador a partir das 4 metodologias, e utilizando um único painel de votantes composto por todos os especialistas. Esta constatação também fornece uma ponderação robusta de todos os indicadores. A Figura 02 mostra os resultados das ponderações para cada nível estratégico.

Nos níveis Gerencial e Técnico, a robustez foi classificada como o indicador de maior peso (26,75% e 26,51%, respectivamente), indicando que a capacidade de o sistema resistir a falhas é a principal preocupação. Essa prioridade se alinha com a literatura que valoriza a robustez como a primeira linha de defesa contra eventos disruptivos (Faturechi e Miller-Hooks, 2015; Twumasi-Boakye e Sobanjo, 2019; Martín *et al*., 2021). Contudo, enquanto os gestores priorizam o fluxo de tráfego (21,44%), os técnicos dão maior peso à capacidade (21,19%), refletindo sua preocupação com a funcionalidade e o potencial de expansão da rede. Essa diferença ilustra as prioridades distintas de cada grupo: o gestor focado na performance geral, e o técnico focado na infraestrutura. (Twumasi-Boakye e Sobanjo, 2019; Nipa *et al*., 2023).

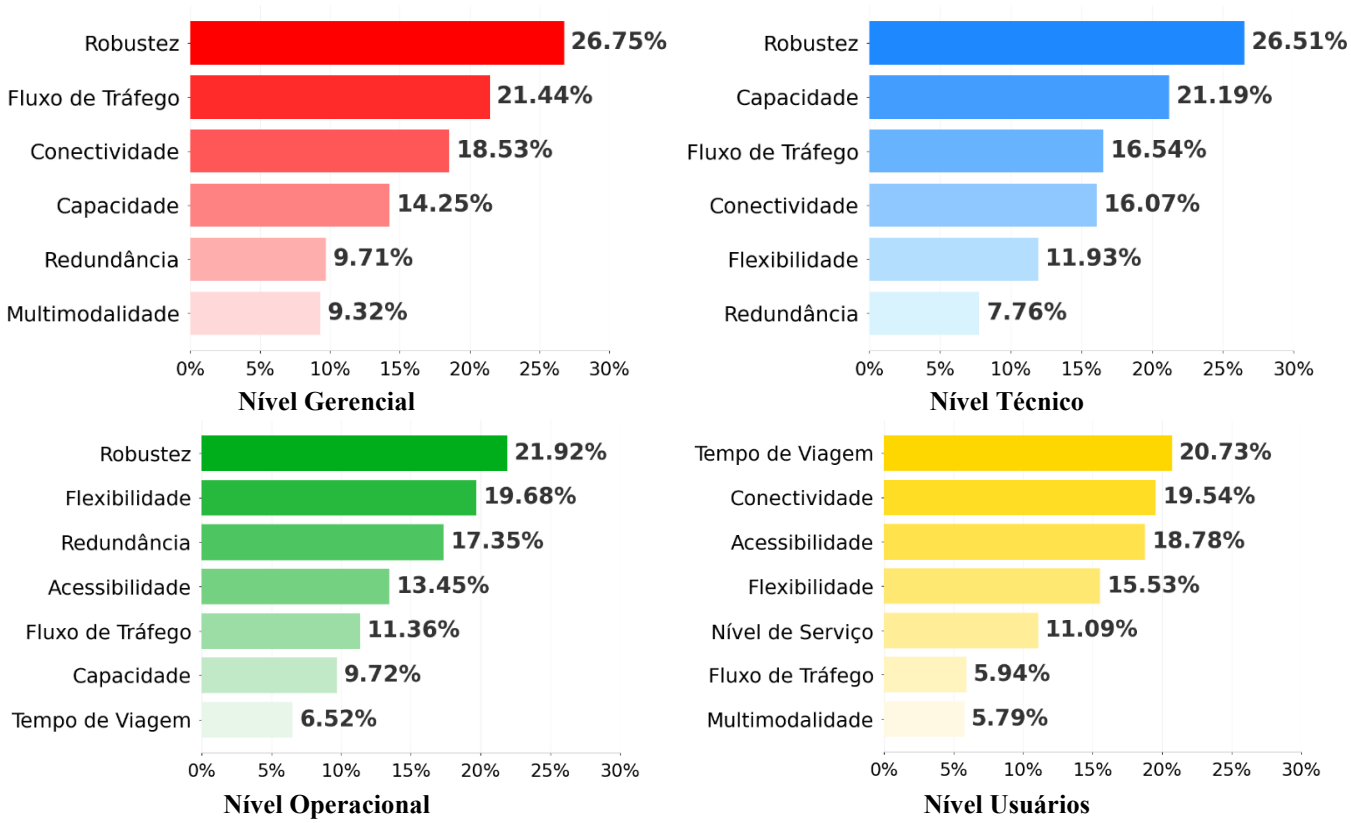


Figura 02: Ponderações para cada nível estratégico.
Fonte: elaboração própria

Enquanto isso, no nível Operacional, embora a robustez (21,92%) ainda seja relevante, a flexibilidade (19,68%) e a redundância (17,35%) ganham destaque. Essa ênfase reflete a necessidade prática de rotas e alternativas para manter o fluxo durante interrupções. Já para os Usuários, o foco está na experiência direta, com o tempo de viagem (20,73%), a conectividade (19,54%) e a acessibilidade (18,78%) liderando a ponderação. Essa priorização mostra que a percepção de resiliência do usuário é mais focada na capacidade de chegar aos seus destinos de forma eficiente e acessível do que nas características estruturais da rede (Martín *et al*., 2021).

As diferenças nos pesos mostram que o planejamento e a gestão de sistemas de transporte precisam de abordagens personalizadas. Entender como cada nível e grupo pondera os indicadores é fundamental para criar estratégias eficazes, otimizar investimentos e aumentar a resiliência do sistema de forma alinhada às prioridades de cada grupo, mas também de uma forma integrada. Assim, os sistemas de transporte não só funcionam bem, mas também atendem às expectativas de todos os envolvidos, do planejador ao usuário (Martín *et al*., 2021; Cordero *et al*., 2024).

Sendo assim, para fornecer uma perspectiva unificada sobre a importância dos indicadores de resiliência, formou-se uma ponderação geral, onde o peso de cada indicador é dado pela média dos valores em que apareceu em cada nível. A Figura 03 mostra o ranking global para os 10 indicadores considerados. Com isso, obteve-se um vetor que integra as percepções e prioridades dos diversos níveis, considerando as distintas prioridades. Esses pesos consolidados expressam a importância de cada indicador de resiliência e servem de base para definir quais indicadores devem receber maior atenção nas intervenções de melhoria, estabelecer metas de desempenho em políticas públicas e orientar investimentos em infraestrutura, operação e serviços.

Nos pesos globais, a Robustez (17%) é o indicador mais relevante na composição da resiliência das redes de transporte, corroborando sua predominância nos níveis gerencial e técnico. Este resultado reflete a importância da resistência estrutural e da capacidade de suportar perturbações como fundamentos essenciais para a continuidade operacional. Em seguida, a Conectividade (12%), reforça o papel da interligação entre os componentes da rede como elemento-chave para manter a mobilidade e a eficiência logística durante situações de crise. Esse indicador, particularmente valorizado no nível do usuário, assegura a continuidade dos fluxos e o acesso equitativo (Faturechi e Miller-Hook, 2015; Dong *et al*., 2020; Zhao e Zhang, 2020).

Enquanto isso, a Flexibilidade e a Acessibilidade, compartilhando a terceira posição (11%), refletem dimensões operacionais e sociais da resiliência. A Flexibilidade é valorizada no nível operacional, pois expressa a capacidade de adaptação rápida a condições variáveis e eventos inesperados (Mostafavi e Inman, 2016; Thacker *et al*., 2017; Gangwal e Dong, 2022). A Acessibilidade, por sua vez, assegura que os usuários mantenham capacidade de alcançar destinos alternativos dentro do sistema, sendo crítica para equidade e continuidade do serviço (Twumasi-Boakye e Sobanjo, 2018; Kim *et al.*, 2023). Sobre outra perspectiva, a Capacidade (10%) ocupa posição intermediária, refletindo a importância de manter o volume operacional e a eficiência da rede, especialmente no nível técnico, relacionando-se diretamente com a utilização real e satisfatória do potencial da rede mesmo sob sobrecarga ou durante eventos de disrupção (Cordero *et al*., 2024; Bi *et al*., 2023).

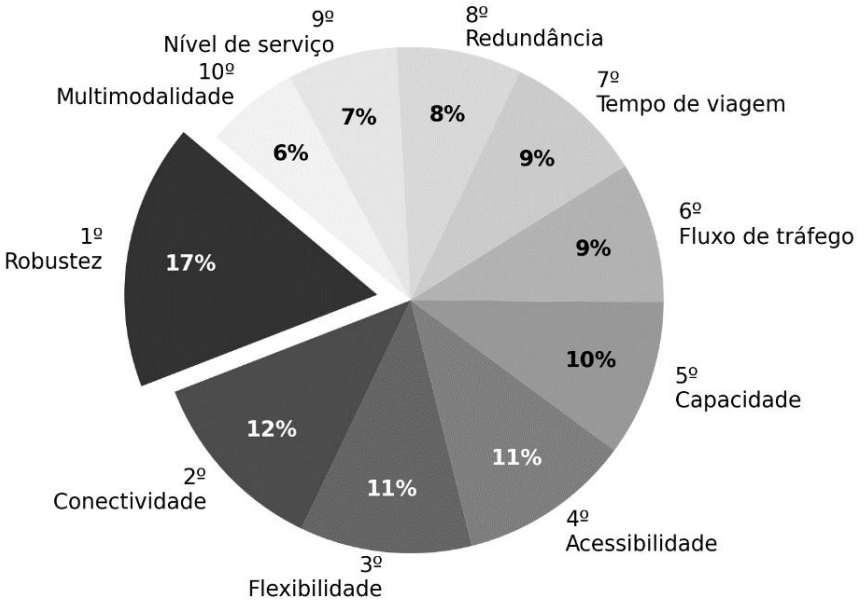


Figura 03. Pesos médios globais dos indicadores de resiliência (%).
Fonte: elaboração própria

Logo após, destacam-se o Fluxo de Tráfego e o Tempo de Viagem empatados (9%). Isso porque, o Fluxo de Tráfego é mais valorizado no contexto gerencial (Bi *et al*., 2023), enquanto o Tempo de Viagem é altamente relevante para os usuários (Adey *et al*., 2021). Na oitava posição, aparece a Redundância, oferecendo caminhos ou componentes alternativos para continuidade da rede, sendo mais valorizada pelo nível gerencial (Twumasi-Boakye e Sobanjo, 2019; Lu *et al*., 2022; Esmalian *et al*., 2022). Os menores pesos foram atribuídos ao Nível de Serviço (7%) onde redes resilientes preservam seu desempenho mesmo diante de sobrecargas, mantendo a confiança do usuário e garantindo o funcionamento contínuo das suas atividades (Adey *et al*., 2021), e à Multimodalidade (6%) que reflete a integração entre diferentes modos de transporte, permitindo que passageiros e cargas migrem entre modais e casos de disrupções ou variações de demanda (Zhao e Zhang, 2020). Embora contribuam para a qualidade e diversificação do transporte, são percebidos como menos críticos para a resiliência estrutural e operacional em sentido amplo (Adey *et al*., 2021; Zhao e Zhang, 2020). Isso sugere que, no contexto global, a prioridade ainda recai sobre atributos físicos e de desempenho primário da rede, em detrimento de características voltadas à experiência do usuário ou à integração modal.

Na prática, os resultados indicam com clareza áreas prioritárias para investimentos em manutenção preventiva, reforço estrutural ou implementação de rotas alternativas em pontos críticos. Indicadores ligados ao desempenho funcional, como tempo de viagem, mobilidade e flexibilidade, desempenham papel fundamental no planejamento de sistemas de monitoramento em tempo real, tecnologias de detecção precoce e gestão adaptativa do tráfego. Esses indicadores são sensíveis a alterações incrementais e, por isso, funcionam como termômetros operacionais da condição da rede, especialmente durante eventos adversos. Já fatores relacionados à robustez e redundância orientam estratégias mais estruturantes, incluindo reforço de pontes, duplicação de vias, criação de anéis viários ou inclusão de rotas alternativas que funcionem como caminhos de escape durante interrupções severas.

Dessa forma, intervenções baseadas nesses resultados tornam a aplicação dos recursos mais eficiente, evitando investimentos em aspectos que, mesmo com baixo desempenho, sua melhora não impactaria significativamente a resiliência global. Ao contrário, o foco passa a recair sobre características da resiliência cuja melhoria gera ganhos expressivos, como falta de resistência estrutural da rede, nós com grande conectividade ou corredores que facilitam a interligação regional de forma flexível e grande capacidade.

Além disso, a análise possibilita desenvolver estratégias de mitigação de risco sob diferentes perspectivas. No nível técnico-operacional, destacam-se protocolos de resposta rápida, pré-posicionamento de equipes, planos de contingência modulares e rotinas de atuação imediata em caso de bloqueios. No nível gerencial, a integração com dados de serviços meteorológicos, projeções de demanda e análises históricas de interrupções permite antecipar impactos e preparar respostas antes que o evento ocorra. Estrategicamente, os resultados subsidiam políticas públicas voltadas à adaptação climática, prevenção de desastres e modernização da infraestrutura viária.

A interpretação integrada dos indicadores também demonstra que a resiliência depende de uma articulação mais ampliada entre infraestrutura, operação e governança. Sistemas de transporte resilientes exigem que órgãos gestores trabalhem de forma coordenada, compartilhando informações em tempo real e estabelecendo fluxos de comunicação claros durante e após eventos críticos. A comunicação eficaz com os usuários seja por meio de aplicativos, painéis eletrônicos, mensagens de alerta ou campanhas educativas é essencial para orientar deslocamentos, mitigar congestionamentos e reduzir riscos. Essa dimensão social da resiliência, muitas vezes negligenciada, pode ter um impacto bem mais direto na eficiência das ações operacionais e na capacidade de retorno da rede ao equilíbrio.

Finalmente, a integração dos resultados obtidos demonstra que a metodologia adotada não apenas identifica vulnerabilidades, mas orienta de maneira concreta a formulação de ações preventivas, adaptativas e responsivas. Ao articular

evidências quantitativas e interpretações qualitativas, o estudo contribui significativamente para o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes, para o planejamento estratégico regional e para a promoção de sistemas de transporte mais seguros, eficientes e preparados para enfrentar futuros desafios climáticos, operacionais e estruturais.

Considerações Finais

A avaliação da resiliência em redes de transporte é fundamental para compreender como sistemas de mobilidade respondem, absorvem e se recuperam de eventos disruptivos, especialmente climáticos. Este estudo teve como objetivo ponderar indicadores de resiliência por meio de quatro Funções de Escolha Social (Borda, Copeland Modificado, Dowdall e Schulze), integradas a uma Técnica de Painel de Especialistas (EPT), com participantes dos setores acadêmico, público e privado. A análise foi estruturada em quatro níveis estratégicos (gerencial, técnico, operacional e usuários), respeitando as especificidades de cada um, sem comparações diretas entre níveis.

Os resultados evidenciaram elevada consistência na priorização dos indicadores dentro de cada nível, confirmada pela convergência entre as quatro SCF, mesmo com a heterogeneidade dos especialistas. Além disso, os testes estatísticos mostraram ausência de diferenças significativas entre os setores, sugerindo uma percepção amplamente compartilhada quanto à importância dos indicadores. Do ponto de vista aplicado, os rankings permitem identificar os indicadores mais relevantes em cada nível: no gerencial, destacam-se robustez e fluxo de tráfego; no técnico, aspectos ligados ao desempenho e à capacidade; e nos níveis operacional e de usuários, elementos como redundância, flexibilidade e acessibilidade, associados à resposta e continuidade do serviço. Essa organização orienta intervenções específicas conforme as atribuições de cada nível decisório.

A ponderação global fornece uma base consistente para estratégias de fortalecimento da resiliência, ao integrar análise multicritério e aspectos estruturais da rede. A convergência entre especialistas e métodos reforça a credibilidade da abordagem como apoio à gestão e às políticas públicas. Como limitação, destaca-se a participação exclusiva de especialistas brasileiros, sugerindo, para estudos futuros, a ampliação internacional da amostra, aplicação em casos empíricos e análise da evolução dos pesos em cenários de mudanças climáticas.

Agradecimentos

Agradece-se aos programas CAPES, PROBIC-FAPERGS e CNPq pelo apoio concedido no desenvolvimento deste trabalho.

Referências

Adey, B. T., Martani, C., Kielhauser, C., Robles, I. U., Papathanasiou, N., Burkhalter, M., Beltran-Hernando, I., & Garcia-Sanchez, D. (2021). Estimating, and setting targets for, the resilience of transport infrastructure. Infrastructure Asset Management, 8(4), 167–190. https://doi.org/10.1680/jinam.20.00011

Balinski, M., & Laraki, R. (2011). Majority judgment: Measuring, ranking, and electing. MIT Press.

Bi, W., MacAskill, K., & Schooling, J. (2023). Old wine in new bottles? Understanding infrastructure resilience: Foundations, assessment, and limitations. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 120, 103793. https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103793

Cirolini M.F., Paschoal, P.T., Becher, D.H, Baroni, M. (2024). Resiliência climática sob o ponto de vista da geotecnia de infraestrutura rodoviária. Revista Estradas nº 29, 18-23 Acesso em: 11/2025, Disponivel em: https://online.fliphtml5.com/zihwi/hmqr/#p=18

Cordero, F., Lamondia, J. J., & Bowers, B. F. (2024). Performance measure-based framework for evaluating transportation infrastructure resilience. Transportation Research Record, 2678(5), 601–616. https://doi.org/10.1177/03611981231190396

Dong, S., Mostafizi, A., Wang, H., Gao, J., Li, X. (2020). Measuring the Topological Robustness of Transportation Networks to Disaster-Induced Failures: A Percolation Approach. Journal of Infrastructure Systems, 26(2). https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000533

Esmalian, A., Yuan, F., Rajput, A. A., Farahmand, H., Dong, S., Li, Q., Gao, X., Fan, C., Lee, C.-C., Hsu, C.-W., Patrascu, F. I., & Mostafavi, A. (2022). Operationalizing resilience practices in transportation infrastructure planning and project development. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 104, 103214. https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103214

Faturechi, R., & Miller-Hooks, E. (2015). Measuring the performance of transportation infrastructure systems in disasters: A comprehensive review. Journal of Infrastructure Systems, 21(1), 04014025. https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000212

Gambatese, J. A., Behm, M., & Rajendran, S. (2008). Design's role in construction accident causality and prevention: Perspectives from an expert panel. Safety Science, 46(4), 675–691.

Gangwal, U., Dong, S. J. (2022). Critical facility accessibility rapid failure early-warning detection and redundancy mapping in urban flooding. Reliability engineering & system safety, 224. https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108555

Green-Armytage, J. (2004). A survey of basic voting methods. Retrieved July 2025, from http://inside.bard.edu/~armytage/personal/voting/survey.htm

Kim, J., Park, S., & Kim, M. (2023). Safety map: Disaster management road network for urban resilience. Sustainable Cities and Society, 96, 104650. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104650

Liu, H. J., Love, P. E. D., Zhao, J., Lemckert, C., Muldoon-Smith, K. (2021). Transport infrastructure asset resilience: Managing government capabilities. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 100. https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103072

Lu, Y., Zhang, Z., Fang, X., Gao, L., & Lu, L. (2022). Resilience of urban road network to malignant traffic accidents. Journal of Advanced Transportation, 2022, 3682472. https://doi.org/10.1155/2022/3682472

Mahboubi, P., Parkes, M., Stephen, C., & Chan, H. M. (2015). Using expert informed GIS to locate important marine social-ecological hotspots. Journal of Environmental Management, 160, 342–352.

Martín, B., Ortega, E., Cuevas-Wizner, R., Ledda, A., & de Montis, A. (2021). Assessing road network resilience: An accessibility comparative analysis. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 95, 102851. https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102851

Mostafavi, A., Inman, A. (2016). Exploratory analysis of the pathway towards operationalizing resilience in transportation infrastructure management. Built Environment Project and Asset Management, 6(1), 106–118. https://doi.org/10.1108/BEPAM-03-2015-0011

Nurmi, H. (2010). Voting theory. Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9045-4_7

Pant, R., Jaramillo, D., and Hall, J. W. (2023). Systemic assessment of climate risks and adaptation options for transport networks in East Africa. Sustainable and Resilient Infrastructure, 8, 12–19. https://doi.org/10.1080/23789689.2023.2181552

Ruiz-Padillo, A., de Oliveira, T. B. F., Alves, M., Bazzan, A. L. C., & Ruiz, D. P. (2016). Social choice functions: A tool for ranking variables involved in action plans against road noise. Journal of Environmental Management, 178, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.04.038

Schulze, M. (2011). A new monotonic and clone-independent single-winner election method. Voting Matters, 17, 9–19.

Thacker, S., Barr, S., Pant, R., Hall, J. W., Alderson, D. (2017). Geographic Hotspots of Critical National Infrastructure. Risk Analysis, 37(12), 2490–2505. https://doi.org/10.1111/risa.12840

Turoff, M. (1970). The design of a policy Delphi. Technological Forecasting and Social Change, 2(2), 149–171.

Twumasi-Boakye, R., & Sobanjo, J. (2019). Civil infrastructure resilience: State-of-the-art on transportation network systems. Transportmetrica A: Transport Science, 15(2), 455–484. https://doi.org/10.1080/23249935.2018.1504832

Whitman, M. G., Barker, K., Johansson, J., & Darayi, M. (2017). Component importance for multi-commodity networks: Application in the Swedish railway. Computers and Industrial Engineering, 112, 274–288. https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.08.004

Yin, K., Wu, J., Wang, W., Lee, D.-H., & Wei, Y. (2023). An integrated resilience assessment model of urban transportation network: A case study of 40 cities in China. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 173, 103687. https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103687

Zhang, D. T. (2020). Methods and rules of voting and decision: A literature review. Open Journal of Social Sciences, 8(1), 60–72. https://doi.org/10.4236/jss.2020.81005

Zhao, T., & Zhang, Y. (2020). Transportation infrastructure restoration optimization considering mobility and accessibility in resilience measures. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 117, 102700. https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102700.

ANÁLISE MECÂNICA E HIDRÁULICA DE PAVIMENTO PERMEÁVEL COM GEOCÉLULA E CONCRETO POROSO

Gabriel Diniz Lima, Pedro Luis da Costa Junior, Mariana Rodrigues Ribeiro dos Santos, Gabriel Orquizas Mattielo Pedroso

UNICAMP, g176543@dac.unicamp.br; FEB – UNESP, pedro.jr@unesp.br; UNICAMP, mrrs@unicamp.br; FEG-UNESP, gabriel.pedroso@unesp.br

Palavras-chave: Geossintéticos; Solução Baseada na Natureza; Mudança Climática.

Resumo

Desde o início do século XXI, os eventos climáticos catastróficos vêm sendo cada vez mais frequentes, o que faz com que os projetos de engenharia tenham que se adequar às mudanças climáticas contemporâneas. No que tange a pavimentação, é imprescindível garantir a drenagem das vias, assim, as equações de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) e a escolha dos materiais adequadamente para evitar um subdimensionamento hidráulico da drenagem do pavimento. Assim, neste artigo, compara-se uma solução utilizando blocos de concreto poroso a uma com geocélula preenchidas com concreto. A geocélula tem a função de aumento da resistência e acoplada ao geocomposto, que tem função drenante, são juntos uma Solução Baseada na Natureza (SbN). Por fim, será avaliado o reaproveitamento de água proveniente das precipitações. A área a ser utilizada como estudo de caso é o estacionamento da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP (FECFAU). Para fazer comparações hidráulicas e mecânicas, levantou-se os dados acerca da drenagem existente, dos cenários de precipitação, da estimativa das vazões de pico esperadas, do dimensionamento mecânico do pavimento, das propriedades hidráulicas dos materiais e, finalmente, realizou-se a comparação dos sistemas (existente e hipotético). O sistema de retenção existente tem uma capacidade de 32,9 m³ totais, contando com 3 reservatórios separados. O número SN (Número estrutural) do pavimento foi de 2,28 e um ESAL (número de tráfego) de 150.356, o que significa que o CBR mínimo para o subleito é de 7,45%. Para um pavimento utilizando SbN aos moldes do supracitado, é necessária uma geocélula que apresente área máxima de 459,2 cm² e 15 cm de altura. Vale ressaltar que a geocélula deve ter os padrões da GS15, devendo ser perfurada e texturizada a fim de garantir que haja maior interação entre a interface PEAD/Concreto. Um exemplo dessa geocélula é a TECWEB®, a indicada para a situação descrita é a TW306. Comparando-se o fluxo de água no pavimento, considerando um C de 0,9, obteve-se que o volume de água existente no pavimento para a vazão crítica é de 53,84 m³, sendo 63,6% além da capacidade dos reservatórios, o que é problemático. Por outro lado, com o concreto permeável seria possível armazenar cerca de 412 m³, valor da ordem de 10 vezes superior ao encontrado no projeto base. Conclui-se que a SbN proposta é uma alternativa ao pavimento comum, não só pela sua interação com o meio-ambiente, mas também pelo seu potencial imenso em relação à hidráulica e pela sua replicabilidade.

Introdução

No século XXI, a intensificação de eventos climáticos extremos decorrentes do aquecimento global tem imposto desafios sem precedentes à infraestrutura urbana, exigindo que a Engenharia Civil alinhe seus projetos às metas globais de sustentabilidade e adaptabilidade. Nesse cenário, torna-se imperativo o cumprimento do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 13, que convoca medidas urgentes para combater a mudança climática, e do ODS 11 focado em tornar as cidades e assentamentos humanos mais inclusivos, seguros e resilientes. Conforme ressaltado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2023), a adaptação das infraestruturas é vital para mitigar riscos de desastres naturais em um futuro de incertezas climáticas, demandando o entendimento rigoroso das modificações nos regimes hidrológicos para o dimensionamento de SbN.

Em relação à pavimentação, cabe compreender o regime de chuvas de um município, cidade ou país para que os cálculos sejam efetuados corretamente como também o dimensionamento da drenagem dos mesmos. Dessa forma, é imprescindível a atualização das Equações de Intensidade-Duração-Frequência (IDF), uma vez que, se desatualizadas, elas podem proporcionar um subdimensionamento da parte hidráulica de um projeto de infraestrutura, indo contrariamente a um planejamento adequado, aumentando o risco de falha e diminuindo a vida útil (Fechine Sobrinho, 2020 e Silva et al., 2025).

No âmbito da sustentabilidade, busca-se diminuir as emissões carbônicas, o impacto ambiental total causado pela infraestrutura e maneiras de evitar ou diminuir os danos oriundos de desastres naturais, como por exemplo de enchentes, muito comuns no país objeto de estudo desta pesquisa. Dessarte, é interessante a utilização de novas técnicas para lidar com essa problemática e contribuir de certo modo ao desenvolvimento sustentável, pois o pavimento tradicional é pouco drenante, contribuindo imensamente para a ocorrência de inundações (Motta, 2020 e Azevedo, 2018).

Nessa perspectiva, uma solução é o pavimento drenante, contendo concreto poroso acompanhado de geossintéticos ele proporciona uma drenagem maior se comparado ao pavimento tradicional com base e sub-base apenas granulares, além disso ele eliminaria a utilização de juntas de dilatação e, armação (mesmo que com telas eletro soldadas). Além de contribuir para as reduções de emissões de gás carbônico de maneira significativa, ele também consegue combater as enchentes e inundações com uma drenagem maior e melhor. O geocomposto consiste em geotêxteis não tecidos acoplados a uma georede, os quais juntos têm função de conduzir adiante o fluxo de água armazenado. A geocélula, que tem geometria semelhante a uma "colmeia de abelha", contribuirá para o confinamento do concreto poroso, auxiliando na capacidade de suporte da camada granular (Palmeira, 2018; Vertematti, 2015 e Paes Leme et al., 2022).

Assim, o objetivo principal do trabalho é propor uma SbN como solução de revestimento na pavimentação de um estacionamento. Os objetivos específicos são: a realização das verificações mecânicas, fazer verificações hidráulicas, tanto no âmbito do armazenamento quanto do escoamento da água pelo pavimento e a reutilização da água captada neste processo diferentemente do proposto no projeto original a ser utilizado no comparativo.

Materiais e Métodos

Área de Estudo

O estacionamento estudado localiza-se na Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo na UNICAMP (FECFAU) Campinas, São Paulo, tratando-se de uma expansão da área de parada de veículos com obras ainda em andamento no momento de elaboração deste artigo. A área de projeto considerada é de 4.590 m². O espaço está inserido na quadra da FECFAU, delimitado pelas ruas Saturnino de Brito, Oscar Niemeyer e Daniel Hogan, no distrito de Barão Geraldo, em Campinas/SP, Figura 01.

A área está inserida numa região de clima tropical de altitude, classificado como Cwa segundo Köppen (1936), caracterizada por verões quentes e chuvosos e invernos secos e amenos, com precipitação média anual de 1.300 a 1.500 mm. Predominantemente inserido na região de bioma Mata Atlântica, transicionando para o Cerrado (IBGE, 2019). O relevo é levemente ondulado, estando no Planalto Atlântico, com altitudes médias entre 600 e 700 m (Aziz Ab'Sáber, 2003).



Figura 01. Espaço da área de estudo analisada. Fonte: autoria própria (2026)

Sistema de Drenagem Existente

A drenagem do projeto original se dá pela condução das precipitações para canaletas superficiais e, posteriormente, para tubulações subterrâneas, que após passarem pelo sistema de amortização de vazões, é conduzida para a rede coletora local.

Cenários de Precipitação

Segundo UNICAMP (2022), foi adotada como chuva de projeto de uma precipitação em 5 minutos, com período de retorno de 1 ano e intensidade de 141,06 mm/h, que será adotada como "cenário base" neste estudo. Foram estabelecidos mais dois cenários, com chuvas 15% e 30% maiores (Extremo 1 e Extremo 2, respectivamente) que o cenário base para considerar o efeito das mudanças climáticas, conforme Silva et al. (2025).

Estimativas de Vazões de Pico

Conforme as diretrizes do DAEE/CETESB (1980), foi utilizado o método racional para estimar a vazão de pico. A metodologia resume-se na Equação (01):

$$Q = C\ i\ A \tag{01}$$

Onde,
Q é a vazão máxima; (m³/s)
C é o coeficiente de escoamento;
i é a intensidade da chuva; (m/s)
A é a área contribuinte. (m²)

Foi adotado C = 0,90 para o pavimento original, representando uma superfície predominantemente impermeável. A intensidade de precipitação considerada é a chuva de projeto (em seus diferentes cenários), com duração de 5 minutos e período de retorno de 1 ano. A área contribuinte considerada foi a área do estacionamento.

Um ponto importante considerando durante a elaboração deste estudo foi que, para os cálculos de vazão de pico, conforme indicado no memorial de cálculo original, foram consideradas vazões apenas na área do estacionamento e, em segunda análise, considerando o escoamento proveniente dos terrenos ao redor.

Dimensionamento Mecânico do Pavimento

Conforme seção típica do pavimento original, disponibilizada em UNICAMP (2022), e utilizando a metodologia de pavimentos da AASHTO (1993), adotada por sua ampla validação internacional e consistência na correlação entre desempenho

estrutural e solicitações de tráfego, foi calculado um Número estrutural de pavimento (SN) equivalente para este pavimento. Além disso, pelo número de vagas e considerações sobre sua rotatividade, foi estabelecido um ESAL (número N de tráfego) de projeto, conforme as Equações (2) e (3) a seguir:

$$SN = a_1h_1 + a_2h_2m_2 \quad (2)$$

Onde,
a_1 e a_2 são coeficientes estruturais;
h_1 e h_2 são as espessuras;
m_2 é coeficiente de drenagem.

$$ESAL = \Sigma\ VDM \times FE \times D_D \times D_L \times 365 \times \frac{(1+r)^n - 1}{r} \quad (3)$$

Onde:
VDM é o volume diário médio do veículo da AASHTO 93;
FE é o fator de equivalência desse mesmo veículo;
D_D é o fator de direção;
D_L é o fator de faixa;
r é a taxa de crescimento de tráfego;
n é o período de projeto em anos.

Com estes dados, foi estimado um valor de Módulo de Resiliência mínimo para o subleito do pavimento, e equivalente valor de CBR, conforme a Equação (4):

$$\log_{10}W_{18} = Z_RS_0 + 9{,}36\ \log_{10}(SN + 1) - 0{,}20 + \frac{log_{10}(\frac{\Delta PSI}{4{,}2-1{,}5})}{0{,}40+\frac{1094}{(SN+1)^{5{,}19}}} + 2{,}32\ \log_{10}(M_R) - 8{,}07 \quad (4)$$

Onde,
W_{18} é o número total de eixos equivalentes de 8,2 ton acumulados;
Z_R é o desvio de padrão normal;
S_0 é o desvio padrão combinado;
ΔPSI é a perda de serventia;
MR é o módulo resiliência de um solo em MPa.

O pavimento permeável equivalente foi dimensionado para resistir mecanicamente de maneira similar ao pavimento original. Portanto a camada de brita original foi mantida, alterando apenas o revestimento, substituindo os bloquetes de concreto intertravados com pó de pedra e camada de areia de regularização por Geocélulas de PEAD TECWEB® preenchidas com concreto poroso. Conforme estudos de Fierro Espinoza (2017) foi estabelecida uma geocélula com área máxima de 459,20 cm² e altura de 15 cm, equivalente a TW306.

O concreto de preenchimento celular foi dosado conforme as diretrizes do ACI 522R-10, visando maximizar a condutividade hidráulica sem comprometer a estabilidade mecânica. Para atingir a porosidade projetada de 20%, adotou-se um traço com ausência de finos (areia limitada a 5%), garantindo a formação de macroporos interconectados. O consumo de materiais por m³ consiste em: 325 kg de cimento, 1.500 kg de brita (10 mm) e 100 kg de água, resultando numa relação água cimento (w/c) de 0,31.

Propriedades Hidráulicas dos Materiais

A permeabilidade e capacidade de armazenamento dos materiais são fatores determinantes no estabelecimento do desempenho do pavimento proposto. O material de preenchimento celular na superfície do pavimento - concreto poroso – apresenta uma elevada permeabilidade, devido ao alto índice de vazios (20%). Segundo recomendações da ACI 522R-10, valores típicos de condutividade hidráulica para este tipo de material giram em torno de 3 a 5 mm/s, aproximadamente 15.000 mm/h. Devido à elevada diferença de magnitude entre essa condutividade e as chuvas de projeto deste estudo, podemos assumir que a água precipitada atravessa rapidamente a camada superficial, evitando a ocorrência de escoamento superficial significativo.

$$V = \sum_{i=1}^{n} n_n h_n A \quad (5)$$

Onde,
V é a volume armazenado (m³);
n_n é a porosidade do material;
h_n é espessura da camada (m);
A é área do estacionamento (m²).

A camada de base (solo-brita) também atuará como elemento de armazenamento temporário de água no sistema. Segundo Oliveira (2015), adotou-se uma porosidade média de 30%. Portanto, a capacidade de armazenamento é estimada com base na espessura das respectivas camadas, área do estacionamento e porosidade dos materiais, conforme a Equação (5).

Assim, o sistema se caracteriza por apresentar uma rápida infiltração na camada superficial, seguida pelo armazenamento temporário por toda a sua estrutura, que deverá ser drenada e conduzida, posteriormente por um geocomposto drenante (com condutividade hidráulica mínima) e tubulações para o armazenamento final em reservatórios convencionais. Além de reduzir significativamente o escoamento superficial e amortecer as vazões geradas por precipitações intensas, essa água armazenada poderá ser utilizada posteriormente para algumas finalidades específicas.

Comparação entre Sistemas

A avaliação de desempenho hidráulico entre o sistema convencional e o pavimento permeável proposto foi feita por meio de uma comparação baseada em parâmetros hidrológicos e hidráulicos representativos. Os principais aspectos dessa análise foram: vazão de pico gerada na área de contribuição, volume de escoamento associado a cada evento crítico de precipitação e capacidade de armazenamento disponível em cada solução.

Além disso, estudou-se o potencial de redução da carga hidráulica imposta à rede de drenagem existente, comparando as diferenças entre volumes e vazões gerados em cada cenário. Também foi considerada a possibilidade de aproveitamento da água armazenada no sistema permeável para usos não potáveis, conforme diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 15527 (2019).

Resultados e Discussão

Caracterização do Sistema de Drenagem Existente

O sistema de drenagem original do estacionamento foi concebido com o intuito de coletar, conduzir e descartar o escoamento superficial de modo controlado. A precipitação sobre a área pavimentada é captada por meio de canaletas distribuídas ao longo do estacionamento, sendo posteriormente conduzidas por tubulações subterrâneas até estruturas de detenção.

O sistema de detenção é constituído por três reservatórios individuais de 4,4 m³, 19,5 m³ e 9,0 m³ (totalizando 32,9 m³ de capacidade de armazenamento – sem contar as tubulações de condução). A função primária desses reservatórios é promover a amortização das vazões de pico geradas por eventos de precipitação, reduzindo a carga hidráulica imposta à rede de drenagem a jusante.

Posteriormente ao armazenamento temporário, a água reservada é direcionada a um sistema de recalque, responsável por seu esvaziamento controlado e lançamento para áreas externas ao estacionamento em pontos distintos (rua, vielas etc.). Tal procedimento evidencia o foco em mitigação de picos de vazão do sistema, não contemplando estratégias de infiltração ou aproveitamento da água pluvial no próprio local.

Portanto, o modelo adotado se baseia na concentração pontual de volumes para, posteriormente, promover o afastamento das águas pluviais da área de estudo. Apesar da grande eficiência hidrológica, tal adoção pode contribuir para sobrecargas do sistema de drenagem urbano em eventos de maior intensidade.

Análise Mecânica do Pavimento

A análise mecânica foi realizada com o propósito de determinar a capacidade estrutural do pavimento existente e propor um pavimento equivalente, do ponto de vista estrutural. Portanto, foi estabelecido o Número estrutural (SN) do pavimento existente, segundo a metodologia AASHTO (1993).

O pavimento existente é constituído de blocos de concreto intertravados com espessura de 8 cm, com fck de 25 MPa, assentados sobre uma camada de 5 cm de pó de pedra, apoiados sobre uma base de solo-brita com 20 cm de espessura. Adotando os seguintes valores de coeficientes estruturais e uma drenagem regular do pavimento, foi calculado o SN:

$$SN = D_1 a_1 + D_2 h_2 m_2 = (8{,}00 \,.\, 0{,}40 + 20{,}00 \,.\, 0{,}13 \,.\, 1{,}00)/2{,}54 = 2{,}28$$

Além disso, conforme o número de vagas disponíveis no projeto (71 vagas), a eventual entrada de caminhões de pequeno porte para carga e descarga de materiais e alta rotatividade de utilização do estacionamento (aulas nos períodos da manhã, tarde e noite), foi calculado um ESAL = 150.356 para um período de retorno de 10 anos.

Com base no SN e ESAL previamente calculados, conforme as Equações (2) e (3), seria necessário um CBR = 7,45% no subleito para suportar os esforços provenientes do passe de veículos em relação ao aporte estrutural utilizado.

Como o pavimento permeável proposto substitui a camada superficial do pavimento por Geocélulas PEAD TECWEB® preenchidas por concreto permeável, um dos pontos sensíveis do dimensionamento é a força de arranque do bloco de concreto dentro da colmeia de células. Segundo estudos de Fierro Espinoza (2017), com base no subleito local e demais parâmetros geotécnicos dos materiais considerados no pavimento, para o passe de um caminhão de pequeno porte com pressão de inflado do pneu de 700 kPa (veículo crítico) seria necessário a utilização de uma geocélula com área máxima de 459,20 cm² e altura de 15 cm. As paredes texturizadas e perfurações na parede da geocélula garantem maior adesão entre a interface concreto/PEAD, estabelecendo a resistência necessária para o passe de veículos dimensionado.

Portanto, a análise mecânica permitiu o estabelecimento de uma equivalência estrutural entre as soluções, garantindo que, para além das funções hidráulicas, o pavimento permeável trabalhe estruturalmente de maneira semelhante à solução original. O comparativo dos pavimentos encontra-se na Figura 02:

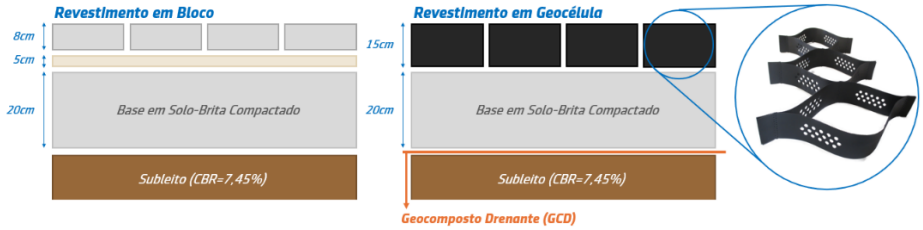


Figura 02. Comparativo dos pavimentos. Fonte: autoria própria (2026).

Análise Hidrológica

A análise hidrológica do sistema tem por finalidade quantificar a resposta do estacionamento em função dos eventos de precipitação, em seus diferentes cenários, focando na estimativa de vazões geradas e volumes associados. Por isso, além do cenário base, foram consideradas situações majoradas para levar em conta o efeito das mudanças climáticas no dimensionamento.

Através do método racional e utilizando o coeficiente de escoamento C = 0,9 (superfícies praticamente impermeáveis), foram calculadas as seguintes vazões para o pavimento original, conforme Tabela 01:

Cenário	i [mm/h]	A1 [m²]	A2 [m²]	Q1 [m³/h]	Q1 [l/s]	Q2 [m³/h]	Q2 [l/s]
Base	141,06	4.580,00	11.615,00	48,45	13,46	122,88	34,13
Extremo 1	162,22	4.580,00	11.615,00	55,72	15,48	141,31	39,25
Extremo 2	183,38	4.580,00	11.615,00	62,99	17,50	159,75	44,37

Tabela 01. Vazões calculadas considerando C = 0,9. Fonte: autoria própria (2026).

Os resultados indicam que em eventos extremos de chuva (chuvas curtas e intensas) a área de estudo contribui de forma significativa para o sistema de drenagem local, sendo fundamental o bom funcionamento dos dispositivos de controle para evitar sobrecargas na rede a jusante. Esse comportamento é característico de superfícies impermeáveis, onde há elevado escoamento superficial. É, portanto, fundamental que sejam realizadas manutenções periódicas nos dispositivos de drenagem, para evitar que sejam obstruídos e não trabalhem conforme o projeto.

Apesar da solução original prever dispositivos de amortização dessas vazões, este apenas retarda o posterior descarte na rede à jusante. Para adaptação à mudança climática, é fundamental que as estruturas de engenharia se aproximem dos funcionamentos vistos na natureza. Nesse contexto, o pavimento permeável proposto apresenta potencial de trabalhar como um "aquífero artificial", reduzindo o escoamento superficial, amortizando também as vazões.

Volume de Precipitação no Evento Crítico

O volume total de água precipitada leva em consideração os diferentes cenários de precipitação, para uma chuva de 5 minutos, nas diferentes áreas de contribuição. Os volumes calculados se encontram na Tabela 02:

Cenário	i [mm/h]	t [min]	A1 [m²]	A2 [m²]	V1 [m³]	V2 [m³]
Base	141,06	5,00	4.580,00	11.615,00	53,84	136,53
Extremo 1	162,22	5,00	4.580,00	11.615,00	61,91	157,01
Extremo 2	183,38	5,00	4.580,00	11.615,00	69,99	177,49

Tabela 02. Vazões calculadas considerando uma chuva de 5 minutos. Fonte: autoria própria (2026).

Os resultados indicam que, em eventos extremos de curta duração, o volume de água gerado sobre a área de projeto é significativo, exigindo dispositivos de armazenamento e controle de escoamento. Tais volumes são fundamentais para avaliação da eficiência entre os sistemas de drenagem analisados e comparação entre a solução convencional e o pavimento permeável proposto.

Comparação com o Sistema de Detenção Existente

Tendo em vista que a capacidade dos reservatórios de detenção previstos em projeto totaliza 32,9 m³, é possível compararmos esse valor com os diferentes volumes calculados nos diferentes cenários. No cenário base, drenando exclusivamente o fluxo proveniente da área pavimentada do estacionamento, temos o volume de 53,84 m³ (63,6% acima da capacidade dos reservatórios). Apesar das galerias e tubulações apresentarem um volume extra de armazenamento, não é recomendado que estas sejam consideradas no dimensionamento. Por isso, dada esta diferença de capacidade, os reservatórios existentes conseguem amortizar parcialmente o impacto desta precipitação extrema, sendo que o excedente ainda precisaria ser drenado, podendo gerar empoçamentos e fluxos superficiais consideráveis no estacionamento.

Nos cenários mais extremos, essa discrepância de torna cada vez mais exacerbada, com volumes consideravelmente maiores que a capacidade de armazenamento dos reservatórios. Esse comportamento evidencia limitações no sistema original,

composto por reservatórios pontuais, sobretudo quando submetido a eventos de maior magnitude (tendência das mudanças climáticas).

Por isso, apesar do sistema existente cumprir sua função de amortecimento parcial de vazões de pico, sua capacidade de armazenamento se mostrou insuficiente para reter integralmente os volumes gerados nos eventos analisados, resultando na necessidade de descarte do excedente para a rede de drenagem urbana. Tal aspecto corrobora com a necessidade em se adotar soluções complementares, capazes de reter e promover o armazenamento distribuído das águas pluviais.

Capacidade de Armazenamento do Pavimento Permeável

O volume de armazenamento do pavimento permeável foi estimado com base na porosidade dos materiais constituintes e geometria das camadas que compõem o sistema. Em primeira instância, o armazenamento se dará na camada de solo-brita, com porosidade média de 30% e espessura de 0,20 m. Todavia, se necessário, o volume armazenado pode se estender para a camada de revestimento com geocélula e concreto poroso, de 0,15 m e 20% de porosidade.

Com base nesses parâmetros, para a área de 4.580 m² do estacionamento, temos um volume armazenável de 274,8 m³ na base e, adicionalmente, 137 m³ no revestimento, totalizando 412,2 m³ de armazenamento possível, valor da ordem 10 vezes superior à capacidade do sistema original. Esse resultado evidencia o potencial do pavimento permeável em atuar como um sistema distribuído, promovendo o armazenamento ao longo de toda a área, diferentemente da abordagem pontual adotada pelos reservatórios tradicionais instalados.

Comparativamente a amortização original, o pavimento permeável proposto tem superior capacidade de amortizar vazões para descarte a jusante (apesar de ser possível propor outros destinos para esse fluxo, que serão abordados posteriormente), reduz a praticamente zero o fluxo superficial e reduz a dependência de estruturas convencionais de detenção. Essas características tornam o sistema particularmente adequado para aplicações em áreas urbanas com limitações de espaço e elevado grau de impermeabilização do solo.

Redução Potencial da Carga Hidráulica

A adoção do pavimento permeável proposto promove alterações significativas na dinâmica de geração e propagação do escoamento superficial, resultando na redução da carga hidráulica imposta à rede de drenagem existente. No sistema convencional, a maior parte da água precipitada é rapidamente convertida em escoamento superficial direcionado às estruturas drenantes, contribuindo diretamente para o aumento das vazões de pico. Todavia, o pavimento permeável favorece a infiltração imediata da água e seu armazenamento temporário ao longo da estrutura.

Entretanto, a eficiência dessa solução está diretamente condicionada à capacidade de drenagem do sistema subsuperficial. Nesse contexto, faz-se necessário a utilização de um geocomposto drenante (GCD) responsável pela condução da água armazenada na estrutura do pavimento. A capacidade de escoamento desse material pode ser avaliada a partir de sua condutividade hidráulica e, principalmente, por sua transmissividade sob condições de confinamento.

O fluxo ao longo do plano do geocomposto (vazão por unidade de largura, q) pode ser descrito pela Equação (06):

$$q = k.i.H \tag{06}$$

Onde,
q é o fluxo (mm/s)
k é a condutividade hidráulica (mm/s);
i é gradiente hidráulico;
H é a espessura efetiva do fluxo.

Por isso, a eficiência do sistema depende diretamente da capacidade do GCD em transmitir o volume armazenado na camada granular em um intervalo de tempo compatível com a frequência dos eventos de precipitação.

Caso a capacidade de drenagem seja insuficiente, pode ocorrer a saturação prolongada da estrutura do pavimento, reduzindo sua eficiência hidráulica e comprometendo seu desempenho mecânico estrutural. Portanto, o dimensionamento adequado do GCD permite o esvaziamento progressivo da estrutura, restabelecendo sua capacidade de armazenamento antes da ocorrência de novos eventos críticos.

Logo, apesar do pavimento permeável apresentar elevado potencial de redução de carga hidráulica por meio do armazenamento distribuído e da infiltração, seu desempenho global está condicionado à adequada integração entre etapas de armazenamento e drenagem, sendo a seleção e dimensionamento do GCD fundamentais para a eficiência global da solução proposta.

Potencial de Aproveitamento de Águas Pluviais

O potencial de aproveitamento de água pluviais foi avaliado com base na precipitação média anual da região de Campinas e na área de contribuição do estacionamento. Baseado em estudos de Silva et al. (2025), foi adotada uma precipitação anual de 1.500 mm, valor compatível com séries históricas pluviométricas da região.

Para os parâmetros estabelecidos, foi calculado um valor bruto de 6.870 m³ de água pluvial incidente sobre a área de estudo. Considerando perdas associadas à evaporação, infiltração residual e ineficiências do sistema de coleta e armazenamento,

de maneira conservadora, foi adotado uma eficiência de 50%, resultando num volume disponível de 3.435 m³ por ano.
Segundo dados da UNICAMP (2025), o consumo anual de água nas dependências da FECFAU foi estimado em 5.725 m³ no ano de 2025. Segundo diretrizes da ABNT NBR 15527 (2019), estimou-se que 50% do consumo total pode ser destinado para usos não potáveis, como descargas sanitárias, limpeza de áreas externas e irrigação de jardins.

Portanto, com base nos dados de 2025, estimou-se 2.862,5 m³ de demanda de usos não potáveis nas dependências da faculdade. Comparando tais ordens de grandeza de volume, podemos estimar, conservadoramente, que o volume captado pelo estacionamento é capaz de abastecer 120% da demanda de água não potável da FECFAU.

É bem verdade que, para viabilizar o aproveitamento deste recurso, é necessário implantar reservatórios específicos para o armazenamento desta água, assim como adaptar o sistema hidráulico da edificação para distribuição segregada. Além disso, o dimensionamento destes reservatórios deve considerar o balanço anual de volumes, a variabilidade temporal das precipitações e demandas, porém, com o manejo estrategicamente alinhado com tais questões, é possível utilizar este recurso hídrico ao longo de todo o ano.

Para além das possibilidades de reuso supracitadas, a água armazenada poderia também ser considerada como fonte complementar para sistemas de combate de incêndio, uma vez atendidos os requisitos normativos aplicáveis. Portanto, o aproveitamento de águas pluviais associado ao pavimento permeável configura-se como uma estratégia eficiente para redução do consumo de água potável e promoção de soluções sustentáveis no ambiente urbano.

Integração com Infraestrutura Verde

O pavimento permeável proposto está inserido no contexto de soluções baseadas na natureza, que buscam mimetizar processos hidrológicos naturais no ambiente urbano (MOTTA, 2020). Os sistemas convencionais de drenagem priorizam o afastamento rápido das águas pluviais, diferentemente da abordagem adotada neste estudo, que promove a retenção, infiltração e aproveitamento local da água, contribuindo para a reaproximação do ciclo hidrológico natural.

Neste tema, destaca-se o conceito de “cidades esponja”, amplamente difundido em estratégias contemporâneas de planejamento urbano. Segundo Yu (2017), as cidades esponjas são modelos de planejamento urbano que priorizam a gestão de águas pluviais por meio de infraestruturas verdes e pavimentos permeáveis, visando absorver, capturar, filtrar e armazenar a água da chuva no próprio local, replicando o ciclo hidrológico natural para prevenir inundações e promover o reuso. O pavimento permeável proposto alinha-se diretamente a esse conceito, ao permitir que a área do estacionamento funcione como elemento ativo de retenção e infiltração, reduzindo o escoamento superficial e promovendo o uso mais sustentável dos recursos hídricos.

Neste sentido, o pavimento permeável pode ser interpretado como um dispositivo descentralizado de manejo de águas pluviais, que pode atuar de modo integrado com outras soluções, como jardins de chuva, valas de infiltração e reservatórios de detenção. A conexão e robustez destas soluções reduzem a dependência de sistemas centralizados, elevando o grau de resiliência hídrica de infraestruturas urbanas contra eventos extremos.

Considerações Finais

No cerne do planejamento, aplicar o concreto permeável em áreas como estacionamentos apresenta elevado potencial de replicabilidade, uma vez que esses espaços representam superfícies extensas e, frequentemente, subutilizadas em termos de desempenho ambiental. A conversão dessas áreas em elementos ativos de controle hidrológico pode contribuir significativamente para estratégias urbanas de adaptação às mudanças climáticas, ocasionando ganhos da ordem de dezenas de vezes em relação ao pavimento comum quanto a parte hidráulica.

O sistema de drenagem de retenção original de projeto é cerca de 64% do necessário para o volume de precipitação previsto no cenário base. Tendo em vista, essa insuficiência de capacidade, o pavimento proposto, além de conseguir armazenar cerca de 10 vezes o volume de retenção existente, se associado a práticas de reuso pode atender a demanda não potável da faculdade em 120%.

Por fim, destaca-se que a efetividade da integração da SbN depende de uma abordagem sistêmica de projeto, que considere não apenas o desempenho individual do pavimento, mas sua interação com os demais elementos da paisagem urbana. Dessa forma, o pavimento permeável proposto não deve ser entendido como uma solução isolada, mas parte de um conjunto de medidas complementares voltadas à construção de cidades mais resilientes, sustentáveis e adaptadas aos desafios contemporâneos, principalmente os hidrológicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem às suas redes de apoio pelo suporte constante durante a realização deste estudo. Estendemos nossa gratidão ao Eng. Sergio Adriano Bizello e à Coordenadoria de Projetos (CPROJ) da UNICAMP, pela disponibilização dos memoriais de cálculo e projetos que serviram de base para este trabalho. Agradecemos também ao Eng. Alberto Fontolan, pelo acompanhamento em visita técnica a campo e pelo suporte técnico com dados vitais para a elaboração do estudo. Um agradecimento é direcionado ao Profº. Drº.Gabriel Orquizas Mattielo Pedroso pela orientação.

À TDM Brasil, pelo suporte técnico institucional , e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento da bolsa de mestrado, nosso reconhecimento. Agradecemos a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a viabilização deste artigo.

Referências Bibliográficas

AB'SÁBER, Aziz. Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete. Farmington Hills, MI: ACI, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15527: Água de chuva - Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

AZEVEDO, Gabriela. Uso de pavimentos permeáveis na drenagem urbana. [S.l.: s.n.], 2018.

FECHINE SOBRINHO, Vicente. Aplicação do método das isozonas na obtenção das equações IDF de chuvas intensas dos municípios de Juazeiro do Norte, Barbalha e Crato–CE. [S.l.: s.n.], 2011.

FIERRO ESPINOZA, Gustavo Javier. Interface de arrancamento de geocélulas e grelhas de geocélula em solos granulares. 2017. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Biomas do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023.

KÖPPEN, Wladimir. Das geographische System der Klimate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, Rudolf. **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1936.

MOTTA, Luciano Dangelo. Pavimento permeável: uma solução sustentável para a pavimentação de vias urbanas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 911-933, 2020.

OLIVEIRA, Virgílio Augusto Sales de. Pavimento permeável com armazenamento de água para fins de reuso: análise do comportamento hidráulico. 2015. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

PAES LEME, Fernão Nonemacher et al. Uso de geoceldas HDPE rellenadas con concreto para pavimentación de vías rurales de bajo costo. In: CONGRESO PARAGUAYO DE VIALIDAD Y TRANSITO, 4., 2022, Luque. **Anais [...]**. [S.l.: s.n.], 2022.

PALMEIRA, Ennio Marques. Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

SÃO PAULO (Estado). Departamento de Águas e Energia Elétrica; CETESB. **Drenagem urbana**: manual de projeto. São Paulo: DAEE/CETESB, 1980.

SILVA, Rodrigo Oliveira da et al. Avaliação e proposição de uma nova equação de chuvas intensas para a cidade de Campinas-SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 26., 2025. **Anais [...]**. [S.l.: s.n.], 2025.

UNITED NATIONS. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: UN Publishing, 2015.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. **Memorial CPROJ-FECFAU nº 7/2022**: Memorial Descritivo de Arquitetura: Urbanização do Entorno do Bloco 7 - FECFAU. Campinas: UNICAMP, maio 2022.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Relatório Gráfico de Consumo de Água: Unidade FECFAU – Dezembro/2025. Campinas: UNICAMP/Prefeitura Universitária, 2025.

VERTEMATTI, José Carlos. Manual brasileiro de geossintéticos. São Paulo: Editora Blucher, 2015.

YU, Kongjian. Sponge City: Theory and Practice. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.

MUDANÇAS CLIMÁTICAS; INSTRUMENTOS LEGAIS AMBIENTAIS CONTRA OS IMPACTOS INDUSTRIAIS SOBRE AS GELEIRAS

1 Julia Virginio da Silva Costa, 2 Elinaldo Martins da Silva Junior, 3 Guilherme Heverton Lima e Silva, 4 Fernando de Figueiredo Porto

1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: julia.virginio@ufrpe.br; 2 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: elinaldo.martins@ufrpe.br; 3 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: guilhermeheverton@gmail.com; 4 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: fernando.portont@ufrpe.br

Palavras-chave: Acordos Internacionais; Derretimento das geleiras; Mudanças Climáticas.

Resumo

A proteção das geleiras é tratada como um grande desafio, que exige articulação entre políticas ambientais, controle de emissões e ações climáticas sustentáveis. Este trabalho analisa os impactos das atividades industriais nas mudanças climáticas, com ênfase no derretimento das geleiras, sob os instrumentos legais ambientais. O estudo consiste em uma revisão bibliográfica, de natureza qualitativa e exploratória, fundamentado em obras científicas, e acordo internacionais, avaliando sua efetividade frente à urgência da conservação glacial. A análise foi centrada na Geleira Glaciar Martial, localizada no extremo sul da Argentina, próxima à cidade de Ushuaia, onde a geleira perdeu mais de 30% de sua massa desde os anos 1960. Apesar do setor industrial ser limitado, o turismo e a queima de combustíveis contribuem para as emissões locais. Trata-se de uma geleira de montanha, altamente sensível às variações de temperatura e precipitação. Além de seu valor ambiental, ela desempenha papel essencial no abastecimento de água local. A situação da geleira evidencia a urgência de fortalecer os marcos legais e ampliar ações concretas diante da intensificação dos eventos climáticos extremos, destacando a importância de integrar responsabilidade ambiental e proteção dos recursos naturais nas decisões públicas e privadas.

Introdução

O acelerado derretimento das geleiras tem se consolidado como um dos indicadores das mudanças climáticas, causado principalmente pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), vindo, em grande parte, de atividades industriais. Marzeion *et al.* (2014, p. 919) destacam que, entre 1991 e 2010, aproximadamente 69% da perda da massa das geleiras foi atribuída a causas antropogênicas, principalmente às emissões de GEE, resultantes da queima de combustíveis fósseis. A aceleração no processo do derretimento das geleiras ativas, devido às mudanças climáticas, pode causar consequências graves na gestão e disponibilidade hídrica a longo prazo (Barnett *et al.,* 2005). Esse impacto pode gerar um desequilíbrio significativo nos ecossistemas costeiros, podendo gerar perda de habitats e ecossistema regional.

De acordo com Wadham (2021), a perda de geleiras deve ser tratada como uma ameaça à vida, pois afeta os ecossistemas e a disponibilidade de água. O aumento do nível do mar resulta em fluxos de água mais variáveis e instáveis, o que produz mudanças no padrões climáticos e das chuvas, além de aumentar os riscos de inundações e deslizamentos de terras, globalmente. Gregory (2004) afirma que o derretimento da camada de gelo da Groenlândia pode elevar o nível do mar em até sete metros ao longo dos próximos mil anos, caso as emissões de gases de efeito estufa não sejam controladas. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2019), o derretimento das geleiras e mantos de gelo contribui significativamente para o aumento do nível do mar e altera os padrões climáticos regionais e globais, e isto já está acontecendo.

Ademais, a pesquisa tem papel de suma importância de analisar a eficácia das normas jurídicas na mitigação dos gases de efeito estufa no derretimento das geleiras, provocado principalmente pelo aquecimento global e das atividades industriais. A fim de mitigar esses impactos, o maior desafio é garantir a preservação das geleiras e a eficácia das políticas públicas e dos acordos internacionais para proteger os ecossistemas costeiros contra o aumento do nível do mar.

Referencial Teórico

Na atualidade, o derretimento das geleiras é um dos maiores sinais de evidência sobre as mudanças climáticas, que estão resultando em diversos problemas ambientais. Entre os principais fatores estão o aquecimento global causado pelas emissões de gases de efeito estufa, a poluição do ar por partículas como o carbono negro, além do desmatamento.

A poluição do ar, surgindo principalmente das atividades industriais como a queima de combustíveis fósseis, libera partículas de carbono negro que, quando se fixam sobre as geleiras, escurecem a superfície do gelo e reduzem sua capacidade de refletir a luz solar. Isso estimula a absorção de calor, que acelera o derretimento das geleirasEstudos indicam que, em regiões como o Himalaia, aerossóis atmosféricos desempenham papel dominante no derretimento de neve e gelo, sendo o carbono negro responsável por pelo menos 30% dessas alterações (Menon *et al.,* 2010). O impacto da poluição do ar sobre as geleiras têm repercussão global, pois contribui diretamente para a elevação do nível do mar e do desequilíbrio climático. Com acordos internacionais, como o Acordo de Paris, firmado em 2015 pela a COP21, através da Organização das Nações Unidas (ONU), estabeleceu como meta, limitar o aquecimento global e reduzir as emissões de poluentes atmosféricos (ONU, 2015).

A elevação do nível do mar é um processo gradual associado principalmente ao derretimento de geleiras e calotas polares, intensificado pelas mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global e da amplificação do efeito estufa por ações

antropogênicas. Steffen (2020) já alertava para a possibilidade de aumento de até 1 metro até 2100, cenário que vem sendo amplamente documentado pelo IPCC desde 1990. Esses dados sustentam acordos internacionais como a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima, criada na Eco-92, e o Acordo de Paris, que estabelecem metas para limitar o aquecimento global a menos de 2°C, com esforço para 1,5°C. Esse aumento do nível do mar representa uma ameaça significativa para regiões costeiras densamente povoadas e ecossistemas marinhos, contribuindo para inundações recorrentes e perda de biodiversidade. Strauss (2020) destaca que, sem a redução das emissões de CO_2, diversas cidades costeiras enfrentarão impactos severos, enquanto iniciativas como a Agenda 21 reforçam a necessidade de ações globais para mitigação e adaptação.

Além disso, a dinâmica oceânica exerce papel essencial nesse processo, especialmente por meio da Circulação Meridional do Atlântico (AMOC), responsável pelo transporte de calor entre hemisférios. Estudos indicam que o enfraquecimento da AMOC pode alterar a distribuição térmica dos oceanos, favorecendo a intrusão de águas mais quentes em regiões polares (IPCC, 2019; SROCC). Na Antártida Ocidental, a atuação da Água Circumpolar Profunda (ACDW) tem acelerado o derretimento basal das geleiras, sendo que mesmo pequenos aumentos na temperatura das águas oceânicas podem intensificar significativamente as taxas de fusão em determinadas regiões (Pritchard *et al.,* 2012; Rignot *et al.,* 2019). De forma semelhante, na Groenlândia, a circulação do Atlântico Norte transporta águas mais quentes para os fiordes, intensificando o derretimento pela base e contribuindo para a desestabilização das massas de gelo (Straneo, 2013). Esses processos reforçam a complexidade das interações entre oceano e criosfera e evidenciam o papel crítico das mudanças climáticas na elevação do nível do mar.

As queimadas, em especial as de grandes proporções em florestas tropicais e boreais, exercem um impacto significativo sobre o derretimento das geleiras ao intensificarem o depósito de fuligem e partículas de carbono negro sobre a superfície do gelo. Essas partículas escuras reduzem o albedo da neve promovendo maior absorção de calor e, consequentemente, acelerando o derretimento superficial (Ward, 2012). Estudos mostram que eventos de incêndios florestais severos, como os registrados na Sibéria e na Amazônia, estão associados a aumentos expressivos na concentração de carbono negro sobre regiões glaciais, como a Groenlândia e partes do Ártico (Keegan, 2014). Segundo Doherty (2010), a presença de carbono negro pode reduzir o albedo da neve em até 5%, o que, em escalas continentais, representa um aumento significativo na taxa de derretimento sazonal. Além disso, a liberação de grandes volumes de gases de efeito estufa durante os incêndios, como dióxido de carbono e metano, contribui para o aquecimento global, que, por sua vez, intensifica o recuo das geleiras ao redor do planeta (IPCC, 2021).

Metodologia

O estudo foi conduzido na Geleira Glaciar Martial, localizada na porção sul da Cordilheira dos Andes próxima à cidade de Ushuaia, na província da Terra do Fogo, extremo sul da Argentina (Figura 1). Essa geleira de montanha é considerada uma das mais meridionais do Hemisfério Sul e tem sido amplamente utilizada como indicador das variações climáticas na região subantártica, especialmente por sua sensibilidade às alterações de temperatura e precipitação (De Angelis *et al.,* 2013). Com uma altitude que varia entre 850 e 1.200 metros acima do nível do mar, a geleira cobre uma área aproximada de 1,8 km² e apresenta características típicas de geleiras temperadas, sensíveis a variações de temperatura e precipitação além de ter um papel fundamental como fonte de água doce para a cidade na qual está situada.

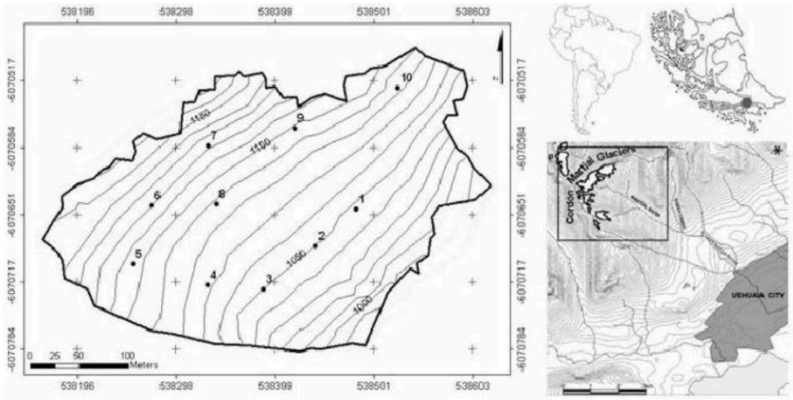


Figura 1 – Localização da geleira Martial e sua relação geográfica com a cidade de Ushuaia.
Fonte: BUTTSTÄDT et al. (2009)

O caso de Ushuaia

Ushuaia cidade onde está localizada a geleira Glaciar Martial é a capital política e administrativa da província da Terra do Fogo, Antártida e Ilhas do Atlântico Sul, Argentina, está localizada no extremo meridional do Cone Sul americano, na margem norte do Canal Beagle (54°48′ S - 68°19′ O). Por outro lado, a posição geográfica da cidade que impõe poucas horas de luz do dia no inverno, e o clima temperado-frio, com geada quase todo o ano, ventos fortes de oeste e ausência de condição térmica de verão e concentram temporariamente as atividades recreativas e turísticas ao ar livre e em contato com a natureza. A cidade recebe cerca de 550 mm de chuva por ano, distribuídos de forma homogênea, e é constantemente moldada por ventos fortes que sopram predominantemente do sudoeste e oeste de acordo com o Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 1981). De acordo com dados do Weatherspark (2025), Ushuaia apresenta duas estações bem definidas em relação à temperatura. A estação mais

quente estende-se por aproximadamente 3,8 meses, de 25 de novembro a 19 de março, caracterizada por temperaturas máximas diárias médias superiores a 11 °C. Janeiro destaca-se como o mês mais quente, registrando uma temperatura máxima média de 13 °C e mínima de 6 °C. Em contraste, a estação mais fria abrange um período de cerca de 3,0 meses, de 23 de maio a 23 de agosto, durante o qual as temperaturas máximas diárias médias permanecem abaixo de 5 °C. Julho é reconhecido como o mês mais frio do ano, com uma temperatura mínima média de -1 °C e máxima de 4 °C.

Embora Ushuaia tenha um setor industrial relativamente pequeno, a queima de combustíveis fósseis para energia, transporte e aquecimento contribui para as emissões regionais de gases de efeito estufa. Essas emissões locais, somadas ao aumento global da concentração atmosférica de CO_2, intensificam o efeito estufa e agravam o aquecimento em zonas de alta latitude. Atividades turísticas também influenciam, o turismo de inverno e ecoturismo geram pressão sobre os ecossistemas locais, aumentando o tráfego de veículos, construções e poluição atmosférica e sonora em áreas naturais frágeis. (Mosti, 2010) A Geleira Martial é um indicador claro das mudanças que afetam os glaciares em escala global. Sua retração acelerada é reflexo direto do aumento das temperaturas e do impacto de atividades humanas tanto locais quanto globais. Medidas urgentes de mitigação das emissões, conservação ambiental e adaptação climática são essenciais para retardar sua extinção e proteger os recursos naturais e sociais da região.

Acordos Internacionais

Entre os acordos mais relevantes estão o Protocolo de Kyoto (1997) e o Acordo de Paris (2015), que estabeleceram metas para a redução das emissões de gases de efeito estufa. A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como Eco-92 ou Rio-92, também foi um marco importante, dando origem à Agenda 21, um plano de ação voltado para o desenvolvimento sustentável em escala global, nacional e local. Em 2015 dando continuidade a esses esforços foram criados os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) adotados em 2015 pela Agenda 2030 da ONU, entre eles o ODS 13 conhecido como Ação Contra a Mudança Global do Clima.

Em 1992, na cidade do Rio de Janeiro, a Agenda 21, feita durante a conferência das Nações Unidas sobre meio ambiente e desenvolvimento (Rio-92), é um acordo de ação global voltado para o desenvolvimento sustentável. De acordo com a Agenda 21, mais especificamente o capítulo 9, intitulado de “Proteção da atmosfera”, “mudanças na composição da atmosfera global podem levar às mudanças climáticas com implicações significativas [...] como a elevação do nível do mar” (Brasil, 1996, p. 71), o que implica diretamente ao derretimentos das geleiras observados na últimas décadas.

A Declaração AMI (Ambition on Melting ice - a Call to Action), foi oficialmente lançada durante a 27ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP 27), realizada em 2022, alertou para os impactos globais do derretimento das geleiras, do recuo das coberturas de neve e do descongelamento do permafrost, dando destaque que esses efeitos estão ocorrendo com gravidade crescente, e que os maiores impactos nas comunidades humanas estão bem além dessas regiões (Ambition on Melting Ice, 2022).

Entre os efeitos mais alarmantes está a escassez de água em regiões de altitude e o aumento do nível do mar. AMI (2022) ressalta que “os impactos graves já estão ocorrendo em relação à escassez de água devido ao encolhimento das geleiras e coberturas de neve; aumento do nível do mar global devido à perda de gelo de mantos de gelo, geleiras e aquecimento dos oceanos; e deslizamentos de terra provocados pelo descongelamento do permafrost”. A urgência de ações não se limita só às regiões frias, e a perda da criosfera devido ao aquecimento global é uma preocupação urgente global, porque os maiores impactos nas comunidades humanas estão bem além dessas regiões. Ainda de acordo com AMI (2022), a redução rápida e de grande escala de emissões global de CO_2 e outros GEE, em todos os setores, para manter viva a possibilidade de limitar o aquecimento global a 1,5 °C, é a melhor opção para retardar a perda progressiva do derretimento das geleiras. Essa urgência é confirmada pelo (IPCC), em seu relatório em 2022, afirmar que sem reduções imediatas e profundas nas emissões de gases de efeito estufa em todos os setores será impossível limitar o aquecimento global a 1,5 °C.

Em 2015, a ONU lançou a Agenda 2030, um plano global composto por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas, que visam erradicar a pobreza, proteger o planeta e assegurar prosperidade para todos até 2030 (ONU, 2015, p. 3). Dentre esses objetivos, destaca-se o ODS 13 Ação Contra a Mudança Global do Clima, que propõe a adoção de medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos, por meio de ações como o fortalecimento da resiliência climática, a integração da política climática nas estratégias nacionais e a promoção de conscientização e educação ambiental (ONU, 2015, p. 23). Este objetivo reconhece que a crise climática é uma ameaça transversal que afeta diretamente a segurança alimentar, a saúde humana, os recursos hídricos e a biodiversidade.

A meta 13.1, por exemplo, busca fortalecer a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima, incluindo desastres naturais extremos, muitos dos quais são agravados pelo derretimento das geleiras. Este fenômeno é uma das manifestações mais alarmantes do aquecimento global, provocado pelas emissões de gases de efeito estufa, e contribui diretamente para a elevação do nível do mar, a instabilidade de ecossistemas glaciais e a perda de fontes de água doce em regiões de alta altitude (IPCC, 2021, p. 29). O recuo das geleiras contribui para a elevação do nível do mar, inundações costeiras, perda de habitats naturais e comprometimento do abastecimento de água doce em diversas regiões do planeta (World Wildlife Fund, 2019). Nesse sentido, a implementação do ODS 13 é essencial para frear os impactos das mudanças climáticas e mitigar os efeitos colaterais do degelo global, atuando como ferramenta de proteção ambiental e justiça climática.

O aumento das temperaturas globais impulsionado pelas emissões descontroladas contribui diretamente para o recuo de massas de gelo em regiões como a Antártida, Ártico e cadeias montanhosas tropicais (IPCC, 2021), e para limitar essas emissões foi criado em 1997 o Protocolo de Kyoto, o primeiro grande acordo internacional voltado especificamente para a redução das

emissões de gases de efeito estufa principais causadores do aquecimento global (UNFCCC, 1998). Seu principal objetivo era incentivar os países desenvolvidos a reduzir suas emissões em pelo menos 5% abaixo do nível atingido em 1990 durante o período de 2008 a 2012. O Protocolo de Kyoto também atua indiretamente na preservação das geleiras, fundamentais para o equilíbrio climático, a regulação do nível dos oceanos e o abastecimento hídrico de milhões de pessoas ao redor do mundo (National Aeronautics and Space Administration, 2020).

Principios das Legislações Ambientais

Os princípios da legislação ambiental tem se tornado cada vez mais relevantes diante da intensificação das mudanças climáticas, principalmente no contexto do derretimento das geleiras. Entre os princípios fundamentais destaca a necessidade de uma abordagem jurídica sólida para mitigar os impactos das atividades humanas sobre o clima global. Os direitos visam preencher a lacuna entre as regras jurídicas, aproximando políticas públicas e legislação ambiental brasileira (Garcia, 2015). A legislação ambiental deve ser orientada por princípios que integrem o conhecimento científico à formulação de normas eficazes, sendo o princípio da precaução essencial diante das incertezas que cercam a resposta das geleiras ao aquecimento global (Sands, 2018).

O princípio da vedação ao retrocesso ambiental, também conhecido como princípio da proibição do retrocesso ecológico, estabelece que os avanços alcançados na proteção ambiental não podem ser desfeitos ou reduzidos, sob pena de violar direitos fundamentais. Esse princípio tem sido reconhecido pela ideia da garantia mínima e estabilidade das normas protetivas ambientais (Sarlet *el al.,* 2012). Em época de mudanças climáticas, como o derretimento das geleiras, qualquer flexibilização das políticas ambientais representa não apenas um retrocesso jurídico, mas uma ameaça concreta à integridade do planeta e à segurança das presentes e futuras gerações.

Decisões administrativas que desestruturam órgãos de fiscalização ambiental ou os planos de mitigação de emissões podem configurar retrocessos inconstitucionais, conforme alerta (Benjamin, 2011), ao afirmar que “a Constituição brasileira não tolera políticas públicas que comprometam a integridade ecológica conquistada por normas anteriores”. Por isso, o princípio atua como um impedimento diante de propostas legislativas ou administrativas que busquem enfraquecer os compromissos climáticos firmados pelo Brasil, como os assumidos no Acordo de Paris (Brasil, 2017).

O princípio do meio ambiente ecologicamente equilibrado, consagrado no Art. 225 da Constituição Federal de 1988, estabelece que todos têm direito a um meio ambiente saudável, impondo ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações (Brasil, 1988). Esse princípio é fundamental nas mudanças climáticas, visto que o aquecimento global ameaça a estabilidade e a qualidade de vida humana. O derretimento das geleiras, documentado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), contribui para o aumento do nível dos oceanos, afetando o equilíbrio climático global, que vem intensificando eventos, como inundações e secas. Essas alterações afetam diretamente o direito constitucional ao ambiente equilibrado.

Essas alterações afetam diretamente o direito constitucional ao equilíbrio ambiental, ao comprometer a biodiversidade, a disponibilidade de recursos naturais e a segurança da população humana. A efetividade desse princípio requer políticas públicas sustentáveis, cumprimento de acordos internacionais sobre o clima global e educação ambiental a fim de garantir a conscientização e transformação da sociedade. Garantir esse direito não é apenas preservar as florestas, mas assegurar uma qualidade de vida para as presentes e futuras gerações. O princípio da precaução estabelece que medidas devem ser adotadas para evitar potenciais danos graves ou irreversíveis ao meio ambiente, esse princípio foi consagrado no Princípio 15 da Declaração do Rio, sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento de 1992, e encontra respaldo no ordenamento jurídico brasileiro por meio da Lei nº 6.938/1981, que institui a Política Nacional do Meio Ambiente (Brasil, 1981). A aplicação do princípio da precaução é essencial, especialmente diante de fenômenos como o derretimento das geleiras, a elevação do nível do mar e a intensificação de eventos climáticos extremos.

A precaução exige decisões e políticas preventivas, principalmente no setor industrial, visando evitar que danos ambientais de larga escala se fortaleçam. Assim, o princípio da precaução atua como instrumento jurídico de gestão de riscos ambientais, orientando decisões públicas e privadas diante da incerteza científica e da urgência climática (Leite, 2021). O princípio da prevenção, balizado pelo Direito Ambiental, determina a adoção de medidas antecipadas para evitar os danos ao meio ambiente antes que eles ocorram, sendo maiormente relevantes frente às mudanças climáticas globais. Na Constituição Federal de 1988, em seu Art. 255, oferece no§1º, inciso IV do artigo, estabelece-se que o Poder Público deve exigir, na forma da lei, “estudo prévio de impacto ambiental, a que se dará publicidade, para a instalação de obra ou atividade potencialmente causadora de significativa degradação do meio ambiente”, concretizando o princípio da prevenção (Brasil, 1988).

A Lei nº 12.187/2009 (Brasil, 2009), que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), destaca em seu Artigo 4º que um de seus objetivos é “promover a adaptação às mudanças climáticas e a mitigação de suas causas, com base no desenvolvimento sustentável”, reforçando o papel da prevenção diante dos impactos como o derretimento das geleiras. Nesse contexto, a atuação das atividades industriais, por serem grandes emissoras de gases de efeito estufa, deve ser rigorosamente controlada sob esses dispositivos legais, com a exigência de estudos de impacto ambiental, conforme estabelecido no Acordo de Paris, e promulgado no Brasil pelo Decreto nº 9.073/2017 (Brasil, 2017). A aplicação dessas normas jurídicas reafirma o princípio da preservação para evitar danos ambientais graves. O princípio estabelece que aquele que quem causar dano ambiental deve arcar com os custos de sua restauração, prevenção e compensação, internalizando os prejuízos ambientais decorrentes de sua atividade (Milare, 2011).

No jurídico brasileiro, esse princípio está previsto na Lei nº 6.938/1981 (Brasil, 1981), que institui a Política Nacional do Meio Ambiente, especialmente em seu Artigo 4º, inciso VII, que trata da “imposição, ao poluidor, da obrigação de recuperar

e/ou indenizar os danos causados". Tal princípio é fundamental no enfrentamento das mudanças climáticas, dado que setores industriais são grandes emissores de GEE que devem ser responsabilizados pelos impactos que geram no equilíbrio climático, como o derretimento das geleiras e o aumento do nível do mar. A responsabilização não deve se limitar só ao dano famigerado, mas também abranger os custos de mitigação e adaptação, conforme o desenvolvimento sustentável e os compromissos assumidos no Acordo de Paris (Brasil, 2017). Assim, o princípio do poluidor-pagador não é apenas uma regra de justiça ambiental, mas também um instrumento essencial de proteção intergeracional. O princípio da reparação integral, estabelecido no Art. 225, § 3º, da Constituição da República Federativa do Brasil de 1988, impõe que os danos causados ao meio ambiente devem ser reparados plenamente, independentemente da existência de culpa. A norma em questão estabelece o compromisso de restaurar, mitigar ou compensar os prejuízos ambientais, considerando as consequências difusas e de longo prazo como aquelas provocadas pelas mudanças climáticas globais. O degelo acelerado das geleiras, especialmente nas regiões polares e montanhosas, tem sido amplamente associado ao aumento das temperaturas globais decorrente da queima de combustíveis fósseis e das emissões industriais de gases de efeito estufa (IPCC, 2021; Marzeion *et al.,* 2014). Diante da impossibilidade técnica de restaurar completamente massas de gelo perdidas, a reparação assume contornos alternativos, como compensações ambientais, medidas de adaptação e políticas climáticas estruturantes.

A aplicação do princípio da reparação integral, nesse contexto, deve ser analisada em articulação com os princípios do poluidor-pagador, da prevenção e da precaução, de forma a assegurar a responsabilização dos agentes estatais e privados que contribuem para o agravamento da crise climática. Conforme estabelecido na Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981), o princípio do poluidor-pagador determina que o poluidor deve arcar com os custos das medidas de prevenção e reparação dos danos ambientais causados, reforçando a responsabilidade dos grandes emissores. Estudos científicos confirmam que o aquecimento global é majoritariamente impulsionado por atividades humanas, especialmente as industriais, o que torna juridicamente legítima a atribuição de responsabilidades aos grandes emissores históricos (Ward, 2012; Steffen, 2020).

Comentários Finais

Com isso, podemos concluir que os impactos das atividades industriais nas mudanças climáticas, com foco no acelerado derretimento das geleiras, e a importância dos instrumentos legais e das políticas públicas para mitigar esses efeitos. Evidenciou-se que a queima de combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa provenientes das indústrias são os principais impulsionadores do aquecimento global, resultando na retração das massas de gelo e em consequências alarmantes, como a elevação do nível do mar, desequilíbrio de ecossistemas costeiros e a escassez hídrica. O estudo de caso da Geleira Glaciar Martial em Ushuaia reforça a realidade desses impactos em escala local e global, sublinhando a urgência de medidas mitigadoras e adaptativas.

Diante desse cenário, foram analisados diversos acordos internacionais, como o Protocolo de Kyoto, o Acordo de Paris, a Agenda 21 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 13), que estabelecem metas e diretrizes para a redução de emissões e a promoção do desenvolvimento sustentável. A Declaração Ambition on Melting Ice também foi destacada por seu alerta sobre a gravidade dos impactos do degelo e a necessidade de ações rápidas para limitar o aquecimento global a 1,5 °C. Adicionalmente, a pesquisa explorou os princípios da legislação ambiental brasileira e sua relevância para o tema, incluindo a vedação ao retrocesso ambiental, o desenvolvimento sustentável, o meio ambiente ecologicamente equilibrado, a precaução, a prevenção, o poluidor-pagador e a cooperação intergeracional. A Constituição Federal de 1988, a Política Nacional do Meio Ambiente e a Política Nacional sobre Mudança do Clima estabelece a base legal para a execução de medidas voltadas à preservação ambiental e climática, exigindo responsabilidade compartilhada entre União, Estados e Municípios.

Conclui-se que o enfrentamento do derretimento das geleiras e das mudanças climáticas exige uma abordagem integrada e urgente, que combine o fortalecimento e a aplicação rigorosa das normas legais existentes com a efetivação de políticas públicas e a cooperação global. É imperativo que os setores industriais, grandes emissores de GEE, sejam rigorosamente controlados e que se promova a transição para modelos produtivos mais sustentáveis, garantindo o direito a um meio ambiente equilibrado para as presentes e futuras gerações.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) pelo apoio institucional, aos organizadores do V Congresso Internacional de Engenharia Ambiental pela oportunidade de divulgação e compartilhamento do conhecimento científico, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à pesquisa, e, de forma especial, à professora Soraya Giovanetti El-Deir, pela condução da disciplina de Instrumentos Legais Ambientais, na qual foi possível a elaboração deste artigo.

Referências Bibliográficas

AMBITION ON MELTING ICE. *The Ambition on Melting Ice (AMI) – A Call to Action*. COP27, 2022. Disponível em: https://ambitionmeltingice.org/ami-declaration.

BARNETT, T. P.; ADAM, J. C.; LETTENMAIER, D. P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, v. 438, p. 303–309, 2005.

BENJAMIN, Antônio Herman de Vasconcellos. A constitucionalização do Direito Ambiental. In: MILARÉ, Édis. *Direito do ambiente: a gestão ambiental em foco interdisciplinar*. 5. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2011. p. 118–139.

BRASIL. *Agenda 21 brasileira: bases para discussão*. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 1996.

BRASIL. *Constituição (1988)*. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Senado Federal, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm.

BRASIL. Decreto nº 9.073, de 5 de junho de 2017. Promulga o Acordo de Paris. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 6 jun. 2017.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2 set. 1981.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 30 dez. 2009.

BUTTSTÄDT, M.; MÖLLER, M.; ITURRASPE, R.; SCHNEIDER, C. Mass balance evolution of Martial Este Glacier, Tierra del Fuego (Argentina) for the period 1960–2099. *Advances in Geosciences*, v. 22, p. 117–124, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.5194/adgeo-22-117-2009.

DE ANGELIS, Hernán; SKVARCA, Pedro; STRELIN, Jorge. Mass balance evolution of Martial Este Glacier, Tierra del Fuego, Argentina, for the period 1960–2099. *Advances in Geosciences*, v. 35, p. 97–103, 2013.

DOHERTY, S. J.; WARREN, S. G.; GRENFELL, T. C.; CLARKE, A. D.; BRANDT, R. E. Light-absorbing impurities in Arctic snow. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 10, p. 11647–11680, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.5194/acp-10-11647-2010.

GARCIA, Ana Maria. *Direito ambiental: introdução à disciplina*. 9. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2015.

GREGORY, Jonathan M. Ice sheet contributions to future sea-level change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, v. 364, n. 1844, p. 1709–1731, 2004.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Relatório especial sobre o oceano e a criosfera em um clima em mudança*. Genebra: IPCC, 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate (SROCC)*. Genebra: IPCC, 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

KEEGAN, K. M. Climate change and forest fires synergistically drive widespread melt events of the Greenland Ice Sheet. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 22, p. 7964–7967, 2014.

LEITE, José Rubens Morato. *Direito ambiental: doutrina, jurisprudência e prática*. 11. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2021.

MARZEION, Ben; COGLEY, J. Graham; RICHTER, Katja; PARKES, David. Attribution of global glacier mass loss to anthropogenic and natural causes. *Science*, v. 345, n. 6199, p. 919–921, 2014. DOI: 10.1126/science.1254702.

MENON, Surabi; KOCH, Dorothy; BEIG, Gufran; SAHU, Subrat; FASULLO, John; ORLIKOWSKI, David. Black carbon aerosols and the third polar ice cap. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 10, p. 4559–4571, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.5194/acp-10-4559-2010.

MILARÉ, Édis. *Direito do ambiente: a gestão ambiental em foco interdisciplinar*. 10. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2011.

MOSTI, Patricia A. El alcance de las actividades turísticas y recreativas en los espacios naturales del Hinterland de Ushuaia-Tierra del Fuego-Argentina. *Estudios y perspectivas en turismo*, v. 19, n. 4, p. 516–533, 2010.

NAÇÕES UNIDAS. *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: https://brasil.un.org.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). *Climate change: effects*. 2020. Disponível em: https://climate.nasa.gov/effects/.

PRITCHARD, Hamish D.; LIGTENBERG, Stefan R. M.; FRICKER, Helen A.; VAUGHAN, David G.; VAN DEN BROEKE, Michiel R.; PADMAN, Laurie. Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, v. 484, p. 502–505, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1038/nature10968.

RIGNOT, Eric; MOUGINOT, Jérémie; SCHEUCHL, Bernd; VAN DEN BROEKE, Michiel; VAN WESSEM, Melchior J.; MORLIGHEM, Mathieu. Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 116, n. 4, p. 1095–1103, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1073/pnas.1812883116.

SANDS, Philippe. *Principles of international environmental law*. 4. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.

SARLET, Ingo Wolfgang; FENSTERSEIFER, Tiago. *Direito constitucional ambiental*. 3. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2012.

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL (ARGENTINA). *Estadística meteorológica 1961–1970*. Buenos Aires: Fuerza Aérea Argentina, 1981.

STEFFEN, Konrad. Climate change and ice sheet dynamics. *Nature Climate Change*, v. 10, n. 3, p. 200–205, 2020.

STRANEO, Fiammetta; HEIMBACH, Patrick. North Atlantic warming and the retreat of Greenland's outlet glaciers. *Nature*, v. 504, p. 36–43, 2013.

STRAUSS, Benjamin H. Sea level rise a growing threat to New York and other U.S. coastal cities. *Climate Central/AP News*, 2020. Disponível em: https://apnews.com/article/5df7986b2b27989acb729d4da17155f8.

UNFCCC. *Acordo de Paris*. Disponível em: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement.

WADHAM, Jemma. Glacier melting and global warming. *World Economic Forum*, 2021. Disponível em: https://www.weforum.org/agenda/2021/11/glacier-melting-global-warming-climate/.

WARD, Deliana Seraphina; KLIMONT, Zbigniew; THOMAS, Jennifer L.; MARLIER, Miriam E.; MURPHY, Kimberly; FLEISCHER, Eva; SHINDELL, Drew T. The changing radiative forcing of fires: global model estimates for past, present and future. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 12, p. 10857–10886, 2012.

WEATHER SPARK. *Clima, condições meteorológicas e temperatura média por mês de Ushuaia (Argentina)*. Disponível em: https://weatherspark.com.

WORLD WILDLIFE FUND (WWF). *Climate change: impacts*. 2019. Disponível em: https://www.worldwildlife.org/threats/climate-change.

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E EVENTOS EXTREMOS: COMO AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS AFETAM A GOVERNANÇA E A ESTABILIDADE POLÍTICA?

1 Victória Fernandes Albuquerque, 2 Chiara Natércia França Araújo
1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: victoria.fernandesalbuquerque@ufrpe.br; 2 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: chiara.franca@ufrpe.br;

Palavras-chave: Estabilidade política; Mudança Climática; Países Vulneráveis

Resumo

A mudança climática é considerada atualmente um dos principais desafios globais do século XXI, que vai além da esfera ambiental, mas também alcança esferas econômicas, sociais e institucionais. Eventos associados às mudanças climáticas como seca prolongada, enchentes e ondas de calor estão associadas ao aumento da temperatura média global e a elevação do nível do mar, o mesmo tem provocado impactos significativos sobre o sistema produtivo, infraestrutura urbana e condições de vida das populações. Esses efeitos também atingem de forma intensa os países mais vulneráveis, que são países de baixa ou média renda , que possuem vulnerabilidade socioambiental e capacidade limitada de adaptação diante dos impactos. Por causa desse cenário, as mudanças climáticas passam a influenciar o equilíbrio ecológico, mas também a estabilidade política e a governança das nações. O presente estudo tem como objetivo analisar como as mudanças climáticas impactam a governança e a estabilidade política, com ênfase nos efeitos socioeconômicos observados em países vulneráveis. A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, de caráter exploratório, desenvolvida por meio de revisão bibliográfica e documental.

Os resultados do presente trabalho indicam que os impactos das mudanças climáticas diante da economia estão relacionados à crescente necessidade de investimento emergenciais para resposta aos desastres ambientais, para melhor adequação e reestruturação do país, estado ou cidade que sofre com os efeitos causados por esses impactos. Em vários contextos, os custos de reconstrução e mitigação superam os investimentos em prevenção, comprometendo recursos públicos que poderiam ser destinados a áreas estruturais como saúde, educação e infraestrutura. Essa estratégia reduz a capacidade de planejamento estratégico dos governos e favorece uma atuação predominantemente reativa, em detrimento de políticas preventivas e estruturantes. Além de prejuízos econômicos, também foi visto que afeta diretamente a segurança alimentar e os meios de subsistência das populações. Alterações nos regimes das chuvas, redução da produtividade agrícola, impactos sobre a pesca e degradação ambiental contribuem para o aumento da insegurança alimentar, sobretudo mais vulneráveis. A consequência é as múltiplas formas de má nutrição e intensificação das desigualdades sociais. Paralelo a isso, o agravamento das condições ambientais impulsiona fluxos migratórios internos e internacionais, motivados pela escassez hídrica, perda de terras produtivas e redução das produtividade econômicas. O deslocamento populacional associado aos fatores climáticos impõe desafios a mais à governança, podendo gerar sobrecarga de serviços públicos, disputas por recursos naturais e tensões sociais. A contribuição para a instabilidade política ocorre especialmente em Estados que já apresentam uma certa fragilidade institucional. Portanto, a diminuição da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos essenciais para a estabilização governamental, causam um aumento na vulnerabilidade ambiental, econômica e social, ampliando riscos estruturais.

Por fim, as mudanças climáticas causam riscos ambientais, aumentam a desigualdade econômica e comprometem a capacidade de gestão governamental. Seus efeitos vão além da esfera ambiental, exercendo pressão sobre a estabilidade política e governança. O enfrentamento às mudanças climáticas necessitam de Leis que tragam estratégias a remediação reais para auxiliar, principalmente países vulneráveis, de baixa e média renda, promovendo estabilidade socioambiental e institucional a longo prazo.

Introdução

As mudanças climáticas são consideradas um dos maiores desafios atuais, ultrapassando a esfera ambiental e alcançando esferas econômicas, sociais e institucionais. O crescimento da temperatura média global, a ocorrência constante de eventos extremos ambientais, as mudanças nos regimes de precipitação e elevação do nível do mar tem provocado impactos significativos sobre os sistemas de produção, infraestrutura e condições de vida das populações de diferentes regiões do mundo. Nesse cenário, os efeitos climáticos não se limitam à degradação ambiental, mas interferem diferentemente na organização política e na capacidade de governança dos Estados, exigindo respostas estruturais cada vez mais complexas.

A governança estatal é o conjunto de mecanismo de estratégia, liderança e controle (Brasil, 2026). Os processos e instituições precisam da governança estatal para tomada de decisões públicas diante das intensificações dos eventos extremos climáticos. A constante ocorrência de desastres ambientais demanda respostas emergências que precisam de recursos financeiros e políticas públicas, muitas vezes em um caráter de urgência. Essa necessidade compromete o planejamento estratégico a longo prazo e impõe aos governantes a constante realocação orçamentária, afetando áreas essenciais como saúde, educação e infraestrutura. Assim, as mudanças climáticas passam a influenciar não apenas o equilíbrio ambiental, mas também a estabilidade institucional e a capacidade administrativa dos estados afetados pelos eventos climáticos.

A governança estatal é o conjunto de mecanismo de estratégia, liderança e controle (Brasil, 2026). Entendida como um conjunto de mecanismos, processos e instituições por meio das decisões públicas diante das intensificações dos eventos extremos

climáticos. A constante ocorrência de desastres ambientais demanda respostas emergências que precisam de recursos financeiros e políticas públicas, muitas vezes em um caráter de urgência. Essa necessidade compromete o planejamento estratégico a longo prazo e impõe aos governantes a constante realocação orçamentária, afetando áreas essenciais como saúde, educação e infraestrutura. Assim, as mudanças climáticas passam a influenciar não apenas o equilíbrio ambiental, mas também a estabilidade institucional e a capacidade administrativa dos estados afetados pelos eventos climáticos.

Além dos impactos econômicos e estruturais, os efeitos climáticos atuam diretamente sobre a segurança alimentar e os meios de subsistência das populações. As mudanças nas precipitações das chuvas, secas prolongadas, enchentes e eventos extremos afetam a produção agrícola, a pesca e outros meios essenciais para a renda e sobrevivência humana, como em países de baixa e média renda, onde existe grande vulnerabilidade socioambiental e menor capacidade de adaptação, esses impactos tendem a ser mais severos e complexos. A insegurança alimentar resultante pode intensificar desigualdades sociais, provocar deslocamento populacionais e ampliar tensões internas, contribuindo para cenários de instabilidade política e fragilidade institucional. Estudos internacionais indicam que as mudanças climáticas atuam como multiplicadoras de risco, agravando conflitos existentes e ampliando vulnerabilidades estruturais, especialmente em regiões já marcadas por desigualdade socioeconômica (IPCC, 2022). A escassez de recursos naturais, como água e terras produtivas, pode intensificar disputas locais, pressionar serviços públicos e desafiar a governabilidade. Além disso, previsões apontam para o aumento de fluxos migratórios associados a fatores climáticos, fenômenos que impõe novos desafios à gestão pública, à cooperação internacional e à segurança regional. Dessa forma, a crise climática assume dimensão estratégica, influenciando diretamente a estabilidade política e a governança das nações. É fundamental compreender que as mudanças climáticas causam impacto na governança estatal e na estabilidade política, especialmente em países vulneráveis aos efeitos dos impactos ambientais e socioeconômicos da crise climática. A ocorrência desses eventos extremos influenciam sobre as políticas públicas preventivas, estratégicas de adaptação e fortalecimento institucional.

Portanto, é fundamental compreender que as mudanças climáticas impactam a organização estatal e a estabilidade política, especialmente nos países mais vulneráveis aos efeitos ambientais e socioeconômicos da crise climática. A análise dessa relação permite não apenas identificar os riscos associados à intensificação dos eventos extremos, mas também refletir sobre a necessidade de políticas públicas preventivas, estratégicas de adaptação e fortalecimento institucional.

Assim, este estudo tem como objetivo analisar como as mudanças climáticas influenciam a governança das nações e a estabilidade política, com ênfase nos impactos socioeconômicos e ambientais em países vulneráveis, destacando as consequências relacionadas à insegurança alimentar, aos deslocamentos populacionais e as fragilidades institucionais decorrentes desse processo.

A crescente complexidade das demandas sociais contemporâneas têm exigido novas abordagens na gestão pública, especialmente no que se refere à articulação entre governança, territorialidade e sustentabilidade. Nesse contexto, a noção de originalidade passa a assumir um papel central na formulação e implementação de políticas públicas, à medida que as dinâmicas sociais, econômicas e ambientais se tornam cada vez mais interdependentes e multifacetadas. A descentralização administrativa, aliada a necessidade de respostas mais eficientes às especificidades locais, reforçam a importância de modelos de governança capazes de integrar diferentes atores e escalas territoriais. A relação entre governança e territorialidade torna-se particularmente relevante quando analisada sob perspectiva da sustentabilidade. A organização político-administrativo dos territórios influencia diretamente a forma como as políticas públicas são concebidas e executadas, impactando a capacidade dos governos de responder a desafios ambientais complexos, como as mudanças climáticas. Nesse sentido, experiências de gestão regional evidenciam que a construção de arranjos institucionais descentralizados pode contribuir para a adaptação às demandas locais, ao mesmo tempo em que promove maior integração entre municípios com características socioeconômicas distintas.

Estudos que analisam estruturas de governança regional indicam que a articulação entre diferentes entes territoriais possibilita a construção de soluções mais inclusivas e alinhadas às realidades do local. A atuação de conselhos de desenvolvimento regional, por exemplo, evidencia a importância da participação institucionalizada de diferentes atores na definição de prioridades e estratégias de intervenção. Essas instâncias permitem a incorporação de demandas individuais e coletivas, ao mesmo tempo em que promovem a reorganização das dinâmicas políticas e econômicas regionais, favorecendo processos de desenvolvimento mais equilibrado e sustentáveis (FRANÇA; MANTOVANELI JUNIOR; SAMPAIO, 2012).

No contexto brasileiro, iniciativas de descentralização administrativa têm buscado fortalecer a gestão regional como estratégia para enfrentar desigualdades e promover o desenvolvimento territorial. A experiência de conselhos regionais demonstra que, ao compartilharem sobre áreas essenciais como saúde, educação e meio ambiente, os municípios passam a reconhecer não apenas suas próprias demandas, mas também os desafios comuns da região em que estão inseridos. Esse processo contribui para a construção de uma lógica cooperativa de gestão, na qual a integração entre diferentes localidades se torna fundamental para a efetividade de políticas públicas. Essa perspectiva ganha mais relevância diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas, que demandam respostas coordenadas e multiescalares. A vulnerabilidade socioambiental não se distribui de maneira homogênea entre os territórios, sendo influenciada por fatores como capacidade institucional, infraestrutura disponível e nível de desenvolvimento econômico. Portanto, a governança regional surge como instrumento estratégico para a promoção de políticas de adaptação e mitigação, permitindo a articulação entre diferentes níveis de governo e a integração de ações voltadas à sustentabilidade.

Além disso, a construção de um senso de regionalidade contribui para o fortalecimento da identidade territorial e para a consolidação de práticas institucionais mais colaborativas. Ao reconhecerem a interdependência entre seus territórios, os municípios tendem a adotar estratégias mais integradas, capazes de responder de forma mais eficaz a problemas complexos e

compartilhados. Esse processo favorece a construção de modelos de desenvolvimento mais inclusivos, baseados na cooperação, na equidade e na sustentabilidade. Diante disso, a articulação entre governança, territorialidade e sustentabilidade se revela fundamental para compreender os desafios contemporâneos enfrentados pelos Estados, especialmente no contexto de mudanças climáticas. A adoção de modelos de gestão descentralizados e integrados pode contribuir significativamente para o fortalecimento da capacidade institucional, para a redução da vulnerabilidade e para a promoção de respostas mais eficazes às transformações ambientais, sociais e econômicas.

A relação entre mudanças climáticas e governança também se manifesta de forma significativa nas interações entre ciência e política, especialmente no que se refere à formulação de políticas energéticas e ambientais. No contexto brasileiro, o debate em torno da exploração de combustíveis fósseis, como exemplo o petróleo do pré-sal, evidencia a complexidade dessas relações, uma vez que envolve interesses econômicos, compromisso ambientais e disputas narrativas sobre o desenvolvimento sustentável. A coexistência entre a necessidade de crescimento econômico e a urgência da mitigação das mudanças climáticas impõe desafio à tomada de decisão governamental, exigindo a conciliação entre diferentes perspectivas científicas e políticas. Estudos que analisam essas dinâmicas apontam que as narrativas científicas desempenham papel fundamental na construção das políticas públicas, influenciando diretamente as estratégias adotadas pelos governos. No caso brasileiros, diferentes interpretações sobre o papel dos combustíveis fósseis no contexto da transição energética contribuíram para a formulação de posicionamentos distintos em negociações internacionais sobre o clima, como observado em momentos relevantes da política climática nacional. Essas narrativas, embora compartilhem o reconhecimento da origem antrópica das mudanças climáticas, divergem quanto às formas de enfrentamento e as prioridades de ação, refletindo a complexidade do tema (VIGILIO et al., 2019).

Nesse sentido, a formulação de políticas climáticas não se dá apenas com base em evidências consolidadas, mas também a partir de interpretações, interesses e disputas institucionais que influenciam a definição de prioridades e estratégias. A análise dessas interações permite compreender como decisões governamentais podem, por vezes, priorizar setores econômicos estratégicos, como o energético, ao mesmo tempo em que buscam atender compromissos internacionais de mitigação das mudanças climáticas. Assim, a governança climática se configura como um processo dinâmico, no qual ciência e política se juntam na construção de resposta para problemas ambientais de forma global.

Material e Métodos

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, de caráter exploratório, desenvolvida por meio da revisão bibliográfica e documental, com o objetivo de analisar a relação entre as mudanças climáticas, a governança das nações e a estabilidade política, com ênfase nos países em situação de maior vulnerabilidade socioambiental.

A metodologia aplicada envolveu técnicas de levantamento, seleção e análise de produções científicas e relatórios institucionais que abordam os impactos das mudanças climáticas sobre a segurança alimentar, os deslocamentos populacionais e as fragilidades institucionais.

As produções científicas foram obtidas por meio de bases de dados reconhecidas, como Google Acadêmico, a Scientific Electronic Library Online (SciELO) e pela plataforma Capes Café. Como recorte temporal, priorizaram-se estudos públicos entre os anos de 2017 e 2023, período marcado pela intensificação das discussões científicas e institucionais acerca dos impactos das mudanças climáticas e de suas implicações socioeconômicas e políticas em escala global.

Resultado e Discussões

Os impactos das mudanças climáticas na economia e na governança são significativos, especialmente quando se compara o custo de ações preventivas com os gastos necessários para lidar com desastres já instalados. Eventos extremos têm exigido dos governos respostas emergenciais de grande escala, comprometendo recursos que poderiam ser destinados ao desenvolvimento social e estrutural. Um exemplo recente ocorreu no estado do Rio Grande do Sul (Brasil), onde chuvas intensas provocaram inundações severas, afetando municípios como Eldorado do Sul. De acordo com os dados divulgados pela mídia nacional, os investimentos governamentais destinados à gestão de desastres ambientais mostram-se inferiores aos prejuízos econômicos gerados por tais eventos (G1, 2024). O desastre resultou em perdas financeiras expressivas para o estado, evidenciando a disparidade entre prevenção e custo de remediação. Nesse contexto, as mudanças climáticas impactam indiretamente o funcionamento econômico de estados e países, pois a necessidade de alocação de recursos para ações emergenciais reduz a disponibilidade orçamentária para áreas essenciais como educação, saúde e infraestrutura. Como consequência, o estado, que deveria atuar de forma planejada e preventiva, passa a operar sob lógica de urgência, reagindo às crises em vez de antecipá-las.

A instabilidade política para mudanças climáticas decorre, em grande parte, dos impactos sobre as condições básicas de sobrevivência da população. Eventos extremos, alterações nos regimes de chuva e elevação das temperaturas afetam diretamente a produção de alimentos, comprometendo a segurança alimentar e a qualidade de vida, sobretudo em países vulneráveis ou em desenvolvimento. Além dos prejuízos econômicos relacionados à reconstrução de cidades e infraestruturas após desastres ambientais, os efeitos climáticos incidem sobre sistemas agrícolas, cadeias produtivas e modos de vida, agravando desigualdades já existentes. Nesses contextos, o direito à alimentação adequada torna-se fragilizado, especialmente em países de baixa e média renda que apresentam vulnerabilidade socioambientais mais intensas. Como resultado, observam-se múltiplas formas de má nutrição na população, incluindo deficiência de micronutrientes, desnutrição e obesidade (FAO, 2017).

A insegurança alimentar, por sua vez, pode desencadear fluxos migratórios, tanto de populações humanas quanto de espécies animais, em busca de condições mais favoráveis. Esse deslocamento forçado gera pressões sociais adicionais, como

sobrecarga de serviços públicos, disputas por recursos e tensões comunitárias, fatores que contribuem para a instabilidade política. Paralelamente, a migração e a incapacidade de adaptação de determinadas espécies as rápidas mudanças de temperatura e habitat aumentam os riscos de extinção. A perda de biodiversidade compromete serviços ecossistêmicos essenciais, como o equilíbrio das cadeias alimentares, a regulação climática e a fertilidade dos solos, reforçando um ciclo de vulnerabilidade ambiental, social e institucional. Estimativas de organismos internacionais indicam que as mudanças climáticas poderão forçar deslocamento populacionais em larga escala nas próximas décadas. Projeções do Banco Mundial apontam que até cerca de 216 milhões de pessoas poderão ser deslocadas internamente até 2050 em decorrência de impactos como secas prolongadas, escassez hídrica, queda da produtividade agrícola e elevação do nível do mar, especialmente em regiões vulneráveis do planeta. Esses fenômenos afetam diretamente atividades como agricultura, pesca e outros meios de subsistência, comprometendo a segurança econômica e alimentar de populações inteiras. O deslocamento populacional provocado por fatores climáticos intensifica pressões sobre áreas receptoras, podendo sobrecarregar serviços públicos, infraestrutura e mercados de trabalho, além de ampliar disputas por recursos naturais. Esse cenário favorece o surgimento de tensões sociais e instabilidade política, transformando a migração climática em um desafio não apenas humanitário, mas também de governança e segurança para os Estados.

Além dos impactos ambientais e sociais, a recorrência de crises associadas às mudanças climáticas compromete diretamente a governança das nações. A necessidade constante de respostas emergenciais reduz a capacidade de planejamento estratégico e dificulta a implementação de políticas públicas de longo prazo. Relatórios internacionais indicam que os efeitos climáticos atuam como multiplicadores de risco, intensificando fragilidades institucionais, tensões sociais e desafios à estabilidade política, especialmente em contextos vulneráveis (IPCC, 2022). Nesse cenário, a combinação entre escassez de recursos, desigualdade e pressão social para enfraquecer a confiança da população no poder público, afetando a governabilidade. Assim, as mudanças climáticas passam a representar não apenas um desafio ambiental, mas um fator estrutural de risco à estabilidade institucional e à gestão estatal.

Comentários finais

A pesquisa realizada evidencia que as mudanças climáticas extrapolam a dimensão ambiental, configurando-se como fator estruturante de impactos econômicos, sociais e institucionais. Observou-se que eventos climáticos extremos, a redução da produtividade agrícola, a insegurança alimentar e os deslocamentos populacionais geram pressões adicionais sobre a capacidade de gestão dos Estados que passam pela instabilidade política causadas pelas mudanças climáticas, especialmente países de baixa e média renda. Nesse contexto, a necessidade de resposta emergencial frequente compromete recursos públicos e limita o planejamento de longo prazo, favorecendo a atuação governamental sob lógica de crise.

Analisou-se, ainda, que os efeitos climáticos ampliam desigualdades já existentes, atingindo de forma mais intensa populações vulneráveis, cuja dependência direta de recursos naturais para a subsistência aumenta a exposição a riscos. A insegurança alimentar, a perda da biodiversidade e os fluxos migratórios associados às alterações ambientais contribuem para tensões sociais, sobrecarga de serviços públicos e disputas por recursos, elementos que podem favorecer cenário de instabilidade políticas e fragilização institucional.

Os aspectos analisados ao longo deste estudo, destaca-se que a complexidade dos impactos das mudanças climáticas exige abordagens de governança cada vez mais integradas e territorialmente articulares. A crescente interdependência entre fatores ambientais, sociais e econômicos reforça a necessidade de modelos de gestão pública que considerem as especificidades regionais, promovendo a descentralização administrativa e a atuação coordenada entre diferentes níveis de governo. A articulação entre governanças, territorialidade e sustentabilidade se torna elemento central para o enfrentamento dos desafios contemporâneos. Experiências de gestão regional demonstram que a construção de arranjos institucionais descentralizados pode favorecer a incorporação de demandas locais e regionais, ao mesmo tempo em que contribui para a formação de políticas públicas mais eficazes e alinhadas às realidades socioambientais. A atuação conjunta entre municípios, especialmente em áreas essenciais como saúde, educação e gestão ambiental, evidencia o potencial de estratégias cooperativas para o fortalecimento da capacidade institucional. Adicionalmente, a consolidação de instâncias de governança regional possibilita a construção de um senso de responsabilidade compartilhada entre os diferentes atores territoriais, favorecendo a adoção de soluções mais inclusivas e sustentáveis. Esse processo contribui para a redução de desigualdade e para a promoção de um desenvolvimento mais equilibrado, aspectos fundamentais diante da intensificação dos impactos climáticos. A literatura aponta que tais arranjos institucionais podem transformar, ainda que de forma gradual , as dinâmicas políticas e econômicas, ampliando a capacidade de resposta dos Estados frente a cenários de crise (FRANÇA; MANTOVANELI JUNIOR; SAMPAIO, 2012).

Dessa forma, o enfrentamento das mudanças climáticas fica reforçado, independente de ações isoladas, mas da construção de modelos de governança integrados, capazes de articular diferentes escalas territoriais e promover a cooperação entre os públicos. A adoção de estratégias descentralizadas, aliadas ao fortalecimento institucional e a participação social, configura- se como caminho fundamental para a promoção da resiliência socioambiental e da estabilidade política em contextos de crescente vulnerabilidade.

Outro aspecto relevante a ser considerado refere-se à interação entre ciência e política na formulação de estratégias de enfrentamento das mudanças climáticas. A análise das narrativas científicas demonstra que, mesmo diante de consensos sobre a existência e as causas antrópicas da crise climática, persistem divergências quanto às formas de atuação e as prioridades de intervenção. Tais narrativas influenciam diretamente na construção de políticas públicas, relevando que a governança climática não é apenas um processo técnico, mas também político e estratégico. A forma como o conhecimento é interpretado e incorporado às decisões governamentais podem direcionar ações de mitigação e adaptação, priorizando determinados setores em detrimento

de outros. Observa-se que a formulação de políticas climáticas está condicionada não apenas a disponibilidade de evidências científicas, mas também a interesses institucionais, econômicos e geopolíticos (VIGILIO et al., 2019).

Portanto, conclui-se que a questão climática deve ser compreendida também como um desafio de governança e estabilidade, e não apenas ambiental. Medidas de mitigação e adaptação, aliadas ao fortalecimento das políticas públicas e da cooperação internacional, mostram-se fundamentais para reduzir vulnerabilidades, prevenir crises humanitárias e preservar a capacidade institucional. Ademais, enfrentar as mudanças climáticas torna-se não apenas um projeto sustentável e ecológico, mas uma estratégia essencial para a segurança, o desenvolvimento e a estabilidade política das nações.

Agradecimentos

A autora agradece à professora Chiara Natércia França Araújo pelo apoio, orientação e suporte acadêmico essenciais para o desenvolvimento deste estudo, bem como à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Para a revisão e o aprimoramento textual, contou-se com o auxílio de ferramentas de Inteligência Artificial.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA BRASIL. Brasil reduziu 16,7% as emissões de gases de efeito estufa em 2024, aponta SEEG. Brasília, 2025. Disponível em: https://agenciabrasil.ebc.com.br. Acesso em: 5 jan. 2026.

BRASIL. Controladoria-Geral da União (CGU). Governança. Brasília, DF. Disponível em: https://www.gov.br/cgu/pt-br/centrais-de-conteudo/campanhas/integridade-publica/governanca. Acesso em: 10 abril. 2026.

FRANÇA, Luciano Marcelo; MANTOVANELI JÚNIOR, Oklinger; SAMPAIO, Carlos Alberto Cioce. Governança para a territorialidade e sustentabilidade: a construção do senso de regionalidade. Revista de Administração Pública, Rio de Janeiro, v. 21, supl. 3, 2012. DOI: 10.1590/s0104-12902012000700010.
ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA (FAO);. Acesso em: 26 março. 2026.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS). América Latina e Caribe: panorama da segurança alimentar e nutricional: sistemas alimentares sustentáveis para acabar com a fome e a má nutrição. Santiago: FAO, 2017. Disponível em: https://dspace.mackenzie.br/items/c50adbc7-72c1-4fbd-afec-64d82bbb9d06. Acesso em: 5 jan. 2026.

UNIVERSIDADE DE MARÍLIA. Revista Argumentum. Disponível em: https://ojs.unimar.br/index.php/revistaargumentum/article/view/674. Acesso em: 5 jan. 2026.

VIGLIO, José Eduardo; DI GIULIO, Gabriela Marques; BARBI, Fabiana; FERREIRA, Lúcia da Costa. Narrativas científicas sobre petróleo e mudanças do clima e suas reverberações na política climática brasileira. Revista, v. 21, n. 51, 2019. DOI: 10.1590/15174522-0215105. Acesso em: 02 abril. 2026.

AGROFORESTRY INFRASTRUCTURE AS A TERRITORIAL STRATEGY FOR CLIMATE RESILIENCE: AN INTEGRATED SPATIAL ANALYSIS IN RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL

1 Alexandre Hüller, 1 Caroline Fasolo; 1 Juliano Cavalcanti; 2 Júlia Paiz Poletto, 2 Eduarda Portugal Canale da Silva, 2 Maria Alice Piovesan, 3 Geraldo Ceni Coelho[3]

1PhD Candidate in Environmental Science and Technology – UFFS – Federal University of Fronteira Sul, e-mail: alexandre.huller@gmail.com; fasolo.caroline@gmail.com; 6446@upf.br; 2Master's Student in Environmental Science and Technology – UFFS – Federal University of Fronteira Sul, e-mail: julia.ppolettoo@gmail.com; duardapcanale@outlook.com; mariaalicepiovesan@gmail.com; 3PhD Professor of the Graduate Program in Environmental Science and Technology – UFFS – Federal University of Fronteira Sul, e-mail: ceni-coelho@gmail.com

Keywords: Agroforestry systems; Territorial planning; Climate adaptation.

Abstract

Extreme hydrometeorological events require territorial strategies capable of integrating climate adaptation, environmental conservation, and sustainable production. In the state of Rio Grande do Sul, the floods that occurred in 2024 reinforced the importance of understanding how the interaction between climatic conditions and landscape structure influences territorial vulnerability. In this context, this study aimed to develop an integrated spatial analysis to identify priority areas for climate adaptation based on an agroforestry infrastructure approach. Climatic data derived from the WorldClim database and land use and land cover information from the MapBiomas Project were integrated within a Geographic Information System environment. The variables were standardized using min–max normalization and combined into a Territorial Priority Index (TPI), constructed from the integration between climate exposure and landscape sensitivity. The results revealed heterogeneous spatial patterns of vulnerability across the state territory, organized along a continuous gradient of socioecological criticality associated with the interaction between climate, land use, and biogeographical context. Areas with lower native vegetation cover and greater predominance of agricultural land use showed higher priority for interventions aimed at the functional reorganization of the landscape. In this context, agroforestry systems are interpreted as components of a territorial agroforestry infrastructure, capable of integrating ecological restoration, hydrological regulation, and sustainable production, including within Permanent Preservation Areas and Legal Reserves. The proposed approach contributes to territorial planning by providing support for the spatial prioritization of integrated strategies for climate adaptation, environmental reconstruction, and the strengthening of socioecological resilience.

Introduction

The intensification of climate change has increased the frequency and severity of extreme hydrometeorological events, generating significant impacts on natural and human systems across different regions of the world (IPCC, 2022). Among the main effects, extreme temperature and precipitation events, as well as floods, stand out due to their associated social, economic, and environmental losses, especially in territories characterized by intense landscape transformation and strong anthropogenic pressure on natural ecosystems. In this context, adaptation strategies that integrate environmental conservation, sustainable land use, and risk reduction have gained increasing prominence in the international scientific debate (Lane, 2017; Ruangpan et al., 2020).

In southern Brazil, the state of Rio Grande do Sul represents an emblematic case of this situation. The floods associated with intense rainfall in April and May 2024 constituted one of the most severe events ever recorded in the state, with precipitation volumes exceeding historical averages and extensive impacts on natural ecosystems, agricultural areas, and urban zones. Recent evidence indicates that the magnitude of the event reflected not only extreme climatic conditions, but also structural fragilities associated with land use and the reduction of native vegetation cover, including areas legally designated for environmental preservation (Lima et al., 2025).

The territory of Rio Grande do Sul presents particularly relevant characteristics for analyzing these dynamics, as it encompasses both the Atlantic Forest and Pampa biomes. These biomes differ in terms of vegetation structure, ecological functioning, and land use patterns, and their coexistence forms a territorial mosaic marked by complex environmental and productive gradients. This heterogeneity directly influences regional responses to extreme events and levels of socioecological vulnerability, making it essential to adopt integrated approaches that simultaneously consider climate and landscape structure (IBGE, 2019). In this context, evidence associated with the 2024 event indicates that the absence or fragmentation of native vegetation in environmentally sensitive areas contributed to the intensification of hydrological impacts, reinforcing the importance of maintaining and restoring vegetation cover in strategic zones of the landscape (Lima et al., 2025). This scenario highlights the need for territorial strategies that incorporate nature-based solutions capable of reducing future risks and enhancing the resilience of productive and ecological systems.

Among these strategies, agroforestry systems (AFS) have been recognized as promising alternatives, as they integrate ecological and productive functions within the same territorial unit. Studies indicate that these systems provide multiple ecosystem services (Jose, 2009), contribute to increased biodiversity, improvement of soil properties, and strengthening of

resilience to climate change (Torralba et al., 2016; Rolo et al., 2023), in addition to promoting productive diversification and greater economic stability for small farmers (Lasco et al., 2014). Furthermore, they present significant carbon sequestration potential, reconciling productive and environmental functions (Nair, 2012).

Beyond the scale of the individual rural property, agroforestry systems can be interpreted as components of a territorial ecological infrastructure, contributing to the functional reorganization of the landscape and to the mitigation of hydrometeorological risks. This perspective is particularly relevant in legally protected areas, such as Permanent Preservation Areas and Legal Reserves, where ecological restoration and sustainable production can operate in an integrated manner, enhancing ecosystem services associated with hydrological regulation, ecological stability, and climate adaptation (Ruangpan et al., 2020). Despite the growing recognition of these approaches, integrated spatial analyses capable of identifying, at the territorial scale, where agroforestry strategies can generate the greatest benefits for climate adaptation and vulnerability reduction remain limited. Most studies remain focused on local or sectoral analyses, without simultaneously integrating climatic variables and structural landscape indicators. In this sense, agroforestry infrastructure is understood in this study as the spatial integration of agroforestry systems and tree-based elements within rural landscapes, capable of performing structural ecological functions—such as hydrological regulation, soil conservation, ecological connectivity, and microclimatic stability—simultaneously with agricultural production.

In this context, this study proposes an integrated territorial approach that combines climatic variables and structural landscape indicators to identify priority areas for climate adaptation in the state of Rio Grande do Sul. It is based on the premise that territorial resilience depends on the ecological organization of rural landscapes, in which tree-based productive systems can act as structuring elements of socioecological resilience. Thus, the study seeks to move beyond vulnerability analysis toward the proposition of a territorial framework applicable to strategies of environmental reconstruction and climate planning. This perspective is aligned with the concept of *working landscapes*, in which productive landscapes are understood as multifunctional systems capable of integrating economic activities and the provision of ecosystem services at the territorial scale (Plieninger et al., 2012). In this approach, biodiversity conservation and rural production coexist within productive and ecological mosaics (Kremen & Merenlender, 2018), so that landscapes that maintain native habitat and ecological connectivity tend to present greater resilience to environmental and climatic changes (Garibaldi et al., 2021).

Materials and Methods

The study was conducted in the state of Rio Grande do Sul, southern Brazil, encompassing the Atlantic Forest and Pampa biomes, whose interface constitutes an important functional ecotone characterized by vegetation mosaics and high environmental heterogeneity resulting from the interaction between climatic and structural landscape gradients (Overbeck et al., 2007; IBGE, 2019; Vancine et al., 2024) (Figure 1). The municipal scale was adopted as the unit of analysis, allowing the integration of different environmental databases within a comparative spatial approach.

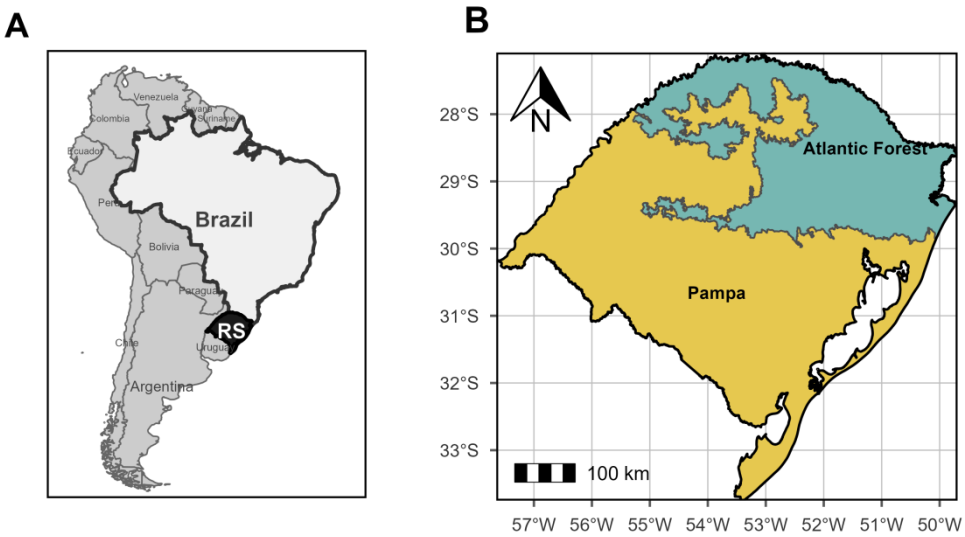


Figure 1. Location of the study area – State of Rio Grande do Sul, Brazil.
Source: The authors (2026).

This study is characterized as an exploratory spatial analysis based on secondary data, structured through a composite index approach and aimed at the integrated assessment of territorial vulnerability at the municipal scale (Anselin, 1999). Climatic variables were obtained from the WorldClim version 2.1 database (Fick & Hijmans, 2017), including annual mean temperature, annual precipitation, and precipitation seasonality. Information related to landscape structure was obtained from the MapBiomas Project (Collection 9), considering variables associated with the proportion of native vegetation cover and the predominance of agricultural land use, used as proxies for the environmental sensitivity of the landscape.

The selected bioclimatic variables—annual mean temperature (BIO1), annual precipitation (BIO12), and precipitation seasonality (BIO15)—were used to represent regional climatic heterogeneity and the environmental gradients associated with water availability, climatic stability, and territorial response to extreme hydrometeorological events in Rio Grande do Sul (Fick & Hijmans, 2017; IPCC, 2022). To allow the integration of heterogeneous variables, the indicators were standardized using the min–max normalization method, a procedure widely applied in the construction of synthetic indices (Nardo et al., 2008). Based on this standardization, two partial indices were constructed: (i) the climate exposure index, derived from the integration of bioclimatic variables, and (ii) the landscape sensitivity index, based on the relationship between native vegetation cover and the predominance of agricultural land use.

The integration of these components was carried out through a Composite Index Approach, resulting in the Territorial Priority Index (TPI), calculated as the simple average of the two normalized indices. The spatial distribution of the TPI was analyzed through cartographic representation and exploratory analysis of spatial patterns, with the aim of identifying territorial gradients associated with the interaction between climatic conditions and landscape structure. The association between climate exposure and landscape sensitivity was evaluated at the municipal scale using Pearson's correlation coefficient (r), with the corresponding statistical significance test (p-value). Additionally, a simple linear model was fitted to graphically represent the observed trend, and the coefficient of determination (R^2) was reported.

The analyses considered the 497 municipalities of Rio Grande do Sul and were presented both for the full dataset and stratified by predominant biome (Atlantic Forest or Pampa). The classification of the dominant biome was performed based on the spatial intersection between municipal boundaries and biome polygons, considering as dominant the biome occupying the largest proportion of municipal area. The results indicated 337 municipalities with predominance of the Atlantic Forest and 160 municipalities with predominance of the Pampa. Additionally, the spatial analysis revealed a significant number of municipalities located in transition zones between biomes. In total, 143 municipalities showed significant intersection with more than one biome, characterizing them as socioecological transition zones. However, municipalities located in transition areas were maintained in the analysis according to their predominant biome and were later considered in the interpretation of territorial gradients.

Results and Discussion

The integrated spatial analysis developed in this study allowed the identification of consistent territorial patterns of climate vulnerability in the state of Rio Grande do Sul, showing that territorial resilience is not homogeneously distributed, but rather results from the interaction between climate exposure and landscape structure.

Spatial patterns of climate exposure and landscape sensitivity

The bioclimatic variables indicated spatial heterogeneity at the state scale, with greater relative exposure concentrated in the northern and northwestern portions of Rio Grande do Sul, while areas in the extreme south showed comparatively lower values (Figure 2). This indicates that climatic pressure is not uniformly distributed across the territory, reflecting the combined effects of annual mean temperature, precipitation regime, and precipitation seasonality. From an interpretative perspective, this result is important because it reinforces that the risks associated with extreme events do not arise solely from the magnitude of meteorological phenomena, but also from the way these conditions affect territories differentiated in ecological and productive terms.

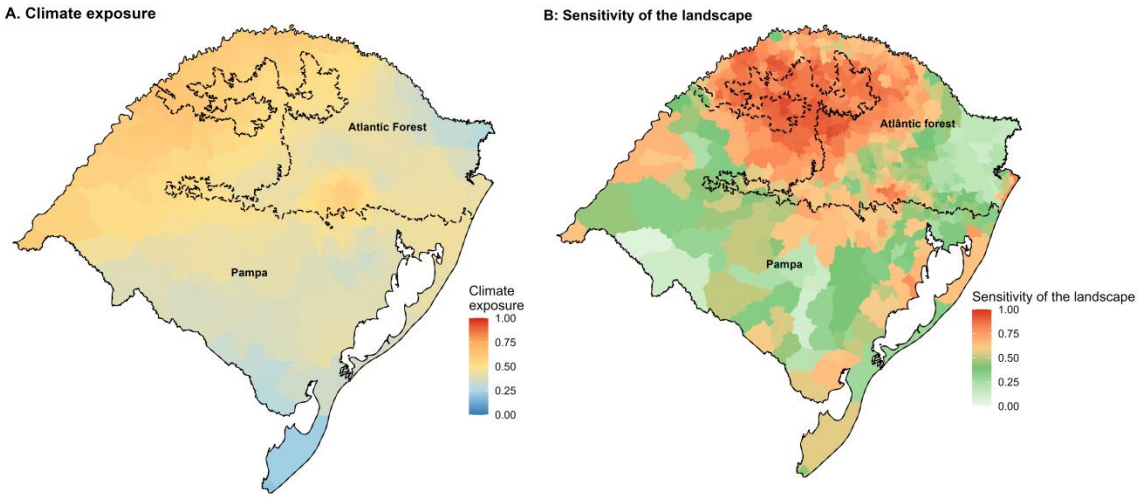


Figure 2. Municipal climate exposure and landscape sensitivity in Rio Grande do Sul.
A = Composite index based on BIO1 (°C), BIO12 (mm), and BIO15 (precipitation seasonality), normalized using the min–max method.
B = Composite index based on the combination of lower native vegetation cover and greater predominance of agricultural land use (MapBiomas, 2024).
Source: The authors (2026).

The analysis of land cover and landscape use revealed a strong structural contrast among municipalities across the state, with some areas characterized by a higher proportion of native vegetation and others marked by the predominance of agricultural land use. The construction of the landscape sensitivity index made it possible to synthesize this relationship in territorial terms, assuming that lower percentages of native vegetation cover and greater agricultural dominance express greater ecological fragility of the landscape (Figure 2). This interpretation is consistent with the scientific literature, which highlights the importance of maintaining native habitat and ecological connectivity for the provision of ecosystem services and the functional stability of productive landscapes (Garibaldi et al., 2021), as well as with the *working landscapes* perspective, in which production and conservation are understood in an integrated way within multifunctional territorial mosaics (Plieninger et al., 2012; Kremen & Merenlender, 2018).

The results show that landscape sensitivity is not merely an abstract ecological attribute, but rather a spatial expression of the loss of environmental functionality within the territory. In landscapes with lower native vegetation cover, there tends to be lower hydrological regulation capacity, reduced soil protection, lower microclimatic stability, and weaker connectivity among remnant habitats, which increases the susceptibility of socioecological systems to climatic disturbances. Recent results related to the 2024 floods in Rio Grande do Sul indicate that a large portion of environmentally sensitive areas already showed deficits in native vegetation cover before the event, reinforcing that landscape configuration plays a central role in amplifying environmental impacts (Lima et al., 2025). In addition, agroforestry systems can act as important refuges for biodiversity conservation in modified landscapes, indicating that the ecological redesign of the rural matrix has both adaptive and conservation relevance (Bhagwat et al., 2008).

Territorial Priority Index and identification of strategic areas

The integration of climate exposure and landscape sensitivity resulted in the definition of the Territorial Priority Index (TPI), whose spatial distribution showed that climate vulnerability in the state does not result exclusively from meteorological patterns, but from the interaction between climate and the ecological structure of the territory (Figure 3). Areas classified as having higher priority concentrate municipalities where greater relative exposure and lower functional landscape integrity coexist, suggesting that environmental risk is amplified when unfavorable climatic conditions affect territories with low native vegetation cover and strong anthropogenic predominance.

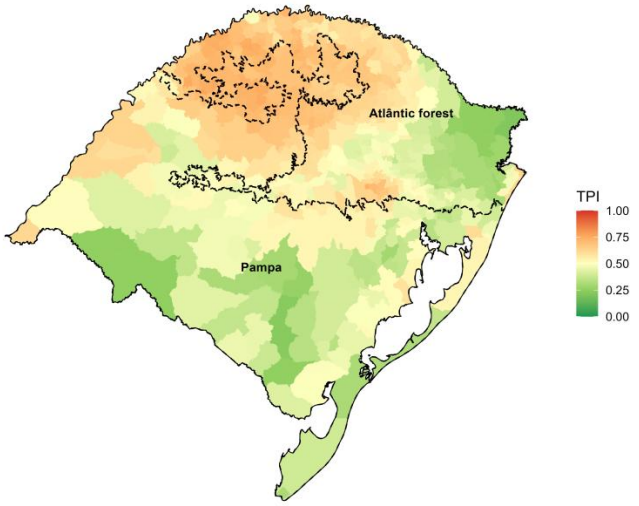


Figure 3. Territorial Priority Index (TPI) map.
Source: The authors (2026).

Higher TPI values were predominantly concentrated in the northern and northeastern portions of the state, especially in areas associated with the Atlantic Forest domain and its transition zones with the Pampa biome (Figure 3). These regions show a combination of greater relative climate exposure and higher landscape sensitivity, reflected by lower proportions of native vegetation cover and greater intensity of agricultural land use. In contrast, the southern and southwestern portions of the state, mostly located within the Pampa biome, presented lower TPI values, suggesting lower relative priority for interventions within the context of the proposed index.

This spatial pattern reinforces the interpretation that territorial vulnerability in Rio Grande do Sul is not homogeneously distributed, but follows a regional gradient associated with the interaction between climatic and structural landscape factors, highlighting areas where the ecological reorganization of the territory becomes more urgent. It is important to emphasize that higher TPI values indicate greater territorial priority for climate adaptation interventions. This result is particularly relevant because it shifts vulnerability analysis from a sectoral perspective to a territorial one. The TPI does not merely identify “more fragile” areas, but rather territories in which the convergence of climatic pressure and ecological sensitivity makes the adoption of adaptive strategies

more urgent. In this sense, the index serves as a support tool for environmental planning, capable of informing public policies for climate adaptation, environmental reconstruction, and ecological restoration at the state scale. This interpretation is also aligned with studies showing that landscape-scale interventions can reduce hydrological impacts and increase the resilience of socioecological systems, especially under the intensification of extreme events (Lane, 2017; Zhu et al., 2024).

In addition to being a diagnostic tool, the TPI acquires strategic value by enabling the identification of territories where ecologically based interventions are likely to generate greater systemic benefits. Rather than guiding only isolated actions, it supports a territorial prioritization logic capable of directing restoration efforts, functional landscape recomposition, and the strengthening of ecological infrastructure in areas where climate adaptation is most needed.

Territorial resilience gradient between biomes

Considering the full set of 497 municipalities, a positive and statistically significant correlation was observed between climate exposure and landscape sensitivity ($r = 0.49$; $R^2 = 0.24$; $p < 0.001$), indicating that, in general, municipalities with greater climate exposure tend to present greater structural landscape sensitivity. Stratification by biome reinforces this trend, although it reveals differences in the intensity of the association between the Atlantic Forest and the Pampa (Figure 4). However, the dispersion of the points shows that this relationship is neither absolute nor uniform, demonstrating that municipalities subjected to similar levels of exposure may present different responses depending on the ecological and productive configuration of their landscapes. In other words, the state territory is not organized only by homogeneous blocks of risk, but rather by a continuous gradient of territorial resilience.

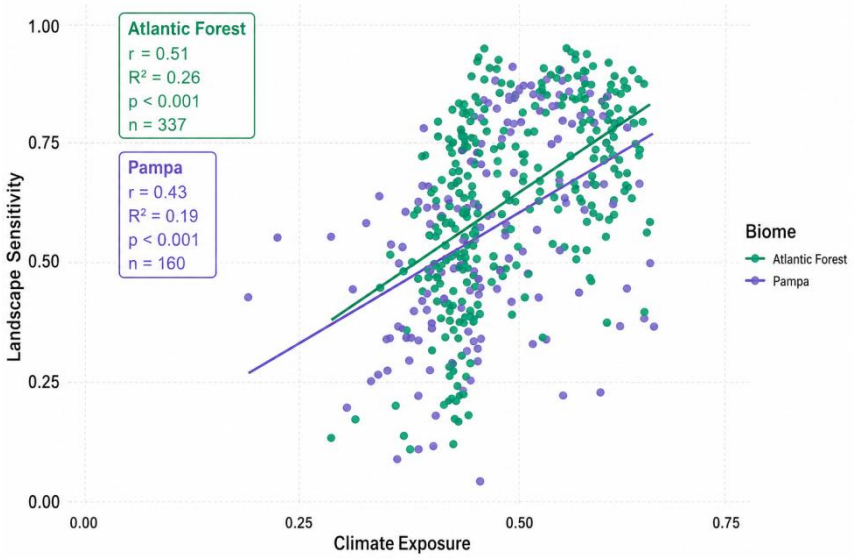


Figure 4. Territorial resilience gradient between climate exposure and landscape sensitivity in the municipalities of Rio Grande do Sul.
Source: The authors (2026).

Biome stratification reinforces the interpretation that, although the Atlantic Forest and the Pampa represent distinct ecological contexts, the results show broad overlap among municipalities from both biomes along the analyzed gradient, indicating that the transitions between them are also functional, environmental, and productive transitions. This interpretation is consistent with the characterization of Rio Grande do Sul as an interface zone between the Atlantic Forest and the Pampa, marked by vegetation mosaics and high environmental heterogeneity. Thus, rather than treating biomes as rigid compartments, the results suggest that territorial resilience emerges from the combination of climate, land use, and landscape organization within each local context.

The 2024 floods reinforce this interpretation. According to Marengo et al. (2024), 478 of the 497 municipalities in Rio Grande do Sul were affected, with more than 2.3 million people impacted and estimated losses of R$ 11.4 billion. The scale of these impacts indicates that the disaster did not result solely from the intensity of rainfall, but also from territorial vulnerabilities associated with landscape structure. In this sense, the TPI supports this logic by identifying municipalities where the combination of greater climate exposure and higher environmental sensitivity increases the priority for adaptation and territorial reconstruction actions.

Agroforestry infrastructure as a strategy for territorial reconstruction

Agroforestry systems can be understood beyond the scale of the individual production unit, assuming the role of components of a territorial agroforestry infrastructure aimed at climate adaptation. The identified spatial patterns indicate that vulnerability is not only associated with the intensity of climatic events, but also with the way the landscape is organized, especially in territories with low native vegetation cover and a strong predominance of agricultural land use. In this context, the environmental reconstruction of vulnerable areas should be understood as a process of functional landscape reorganization, in which tree-based elements assume a structuring role in the ecological and productive stability of the territory.

Classical and contemporary studies highlight that AFS contribute to increased biodiversity, soil protection, hydrological regulation, microclimate improvement, and carbon sequestration, in addition to reducing the vulnerability of productive systems to climate variability (Jose, 2009; Torralba et al., 2016; Rolo et al., 2023). Recent evidence also demonstrates that the resilience of smallholders to climate extremes depends not only on climatic conditions, but also on structural landscape factors, access to resources, and adaptive productive strategies, directly influencing food security and the stability of rural livelihoods (Baffour-Ata et al., 2024). In the context of this study, the role of AFS is expanded: they are interpreted as structuring elements of a territorial infrastructure, capable of connecting vegetation fragments, reducing landscape fragmentation, and restoring ecological functions at the regional scale. Furthermore, the literature on nature-based solutions reinforces that strategies integrating conservation and production tend to be more efficient and sustainable for climate adaptation, especially when implemented at the landscape scale (Cohen-Shacham et al., 2019; Ruangpan et al., 2020). In this sense, agroforestry infrastructure can be understood as an applied form of nature-based solution, as it combines ecological restoration, sustainable production, and climate adaptation within the same territorial approach.

In the specific context of Rio Grande do Sul, recent extreme events, especially the 2024 floods, highlighted the fragility of landscapes with low vegetation cover and high anthropogenic pressure, reinforcing the need for strategies that enhance hydrological regulation capacity and environmental stabilization. Recent studies indicate that areas with greater ecological integrity tend to present a higher capacity to buffer extreme hydrological events, while degraded landscapes intensify the impacts of floods and erosion (Lane, 2017; Lima et al., 2025; Zhu et al., 2024). In this scenario, the adoption of agroforestry systems in priority areas can contribute to increasing water infiltration into the soil, reducing surface runoff, and improving water retention across the landscape, acting as a key element in mitigating hydrological impacts.

Additionally, agroforestry systems can function as biodiversity refuges in modified landscapes, contributing to species conservation and the maintenance of essential ecological functions (Bhagwat et al., 2008). This function is particularly relevant in highly fragmented contexts, as observed in several regions of the state, where connectivity among native vegetation remnants is limited. By integrating production and conservation, AFS contribute to the construction of more resilient landscapes, capable of responding more adaptively to climatic pressures.

Conceptual model of territorial resilience

Based on the results obtained, a conceptual model of territorial resilience is proposed (Figure 5), in which the interaction between climate exposure and landscape structure defines different levels of vulnerability and adaptive capacity across the state territory. In this model, agroforestry infrastructure acts as a mechanism for the ecological reorganization of the landscape, promoting functional connectivity, hydrological regulation, and productive stability in contexts marked by extreme events and high environmental heterogeneity.

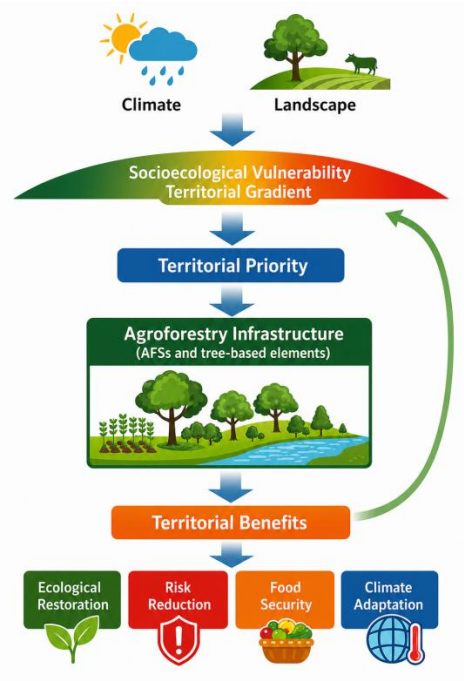


Figure 5. Proposed conceptual model.
Source: The authors (2026).

Final Considerations

The integrated spatial analysis showed that climate vulnerability in the state of Rio Grande do Sul results from the interaction between climatic conditions and landscape structure, and is not homogeneously distributed across the territory. The

Territorial Priority Index (TPI) made it possible to identify strategic areas where the convergence of greater climate exposure and higher landscape sensitivity indicates greater socioecological criticality and priority for climate adaptation and ecological restoration actions.

The results demonstrate that the state territory is organized along a continuous gradient of socioecological vulnerability, in which the Pampa and Atlantic Forest biomes, although distinct, are functionally connected through environmental and productive transitions. This configuration reinforces the need for territorial planning strategies that consider the spatial heterogeneity of the landscape, overcoming approaches based exclusively on biogeographical boundaries.

Agroforestry systems can be interpreted as components of a territorial agroforestry infrastructure, capable of integrating ecological restoration, hydrological regulation, and sustainable production, with potential application in Permanent Preservation Areas and Legal Reserves. The proposed conceptual model synthesizes this approach by articulating spatial patterns and territorial strategies for climate adaptation, offering a methodological and analytical basis to guide the identification of priority areas, with the potential to support public policies for environmental planning, ecological restoration, and post-disaster reconstruction.

The implementation of agroforestry infrastructure, guided by the Territorial Priority Index (TPI), goes beyond the technical dimension of ecological restoration, configuring itself as a strategy for Critical and Climate Environmental Education and as a reference for public policies. By integrating production and conservation, these areas become fundamental pedagogical territories for raising awareness among local communities about the interdependence between landscape structure and resilience to extreme events.

Finally, the results highlight the potential of the integrated use of territorial indicators to support the spatial prioritization of agroforestry strategies in Rio Grande do Sul, while also indicating limitations inherent to the scale and scope of the adopted approach. The absence of variables related to the hydrological dynamics of the landscape, such as the condition of Permanent Preservation Areas and their overlap with flood-prone zones, represents an important gap to be incorporated in future stages. In this sense, the development of a new analytical layer integrating these elements is proposed, allowing the refinement of the territorial prioritization of agroforestry interventions under a more robust and integrated perspective of climate adaptation, ecological restoration, and water protection.

Acknowledgements

The authors would like to thank UFFS – Federal University of Fronteira Sul, CAPES – Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel, and CNPq [441951/2025-2] for the support received.

Declaration of AI use

The authors used ChatGPT-5.2 (OpenAI) to improve language clarity. The content was reviewed and edited by the authors to ensure accuracy and appropriateness.

References

ACREMAN, M.; HOLDEN, J. How wetlands affect floods. *Wetlands*, v. 33, p. 773–786, 2013.

ANSELIN, L. Interactive techniques and exploratory spatial data analysis. In: LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; AGUIRE, D.; RHIND, D. (eds.). *Geographical Information Systems*. New York: John Wiley & Sons, 1999.

BAFFOUR-ATA, F. et al. Climatic and non-climatic factors driving the livelihood vulnerability of smallholder farmers in Ahafo Ano North District, Ghana. *Regional Sustainability*, v. 5, n. 3, p. 100157, 2024.

BHAGWAT, S. A. et al. Agroforestry: a refuge for tropical biodiversity? *Trends in Ecology & Evolution*, v. 23, n. 5, p. 261–267, 2008.

COHEN-SHACHAM, E. et al. Core principles for successfully implementing and upscaling nature-based solutions. *Environmental Science & Policy*, v. 98, p. 20–29, 2019.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, v. 37, n. 12, p. 4302–4315, 2017.

GARIBALDI, L. A. et al. Working landscapes need at least 20% native habitat. *Conservation Letters*, v. 14, n. 2, e12773, 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Biomas e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

JOSE, S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, v. 76, p. 1–10, 2009.

KREMEN, C.; MERENLENDER, A. M. Landscapes that work for biodiversity and people. *Science*, v. 362, n. 6412, eaau6020, 2018.

LANE, S. N. Natural flood management. *WIREs Water*, v. 4, e1211, 2017.

LASCO, R. D.; DELFINO, R. J. P.; CATACUTAN, D. C. Agroforestry systems: helping smallholders adapt to climate risks. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 5, p. 825–833, 2014.

LIMA, D. O.; SKUPIEN, F. L.; MOSCON, A.; WEBER, M. M. When waters rise: biodiversity potentially affected by a major flooding event in Southern Brazil. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 23, p. 183–190, 2025.

MARENGO, J. A. et al. O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. *Estudos Avançados*, v. 38, n. 112, p. 203–228, 2024.

NAIR, P. K. R. Carbon sequestration studies in agroforestry systems: a reality-check. *Agroforestry Systems*, v. 86, p. 243–253, 2012.

NARDO, M. et al. *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. Paris: OECD, 2008.

OVERBECK, G. E. et al. Brazil's neglected biome: the South Brazilian Campos. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, v. 9, p. 101–116, 2007.

PLIENINGER, T. et al. Appreciation, use, and management of biodiversity and ecosystem services in California's working landscapes. *Environmental Management*, v. 50, p. 427–440, 2012.

ROLO, V. et al. Agroforestry potential for adaptation to climate change: a soil-based perspective. *Soil Use and Management*, v. 39, n. 3, p. 1006–1032, 2023.

RUANGPAN, L. et al. Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction: a state-of-the-art review of the research area. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 20, p. 243–270, 2020.

TORRALBA, M.; FAGERHOLM, N.; BURGESS, P. J.; MORENO, G.; PLIENINGER, T. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 230, p. 150–161, 2016.

VANCINE, M. H. et al. The Atlantic Forest of South America: spatiotemporal dynamics of the vegetation and implications for conservation. *Biological Conservation*, v. 291, 110499, 2024.

WATSON, K. B. et al. Quantifying flood mitigation services: the economic value of wetlands and floodplains for reducing flood damages. *Ecological Economics*, v. 130, p. 16–24, 2016.

ZHU, Q.; KLAAR, M.; WILLIS, T.; HOLDEN, J. A quantitative review of natural flood management research. *WIREs Water*, v. 12, e1765, 2024.

RESILIÊNCIA DE UM SISTEMA DE DRENAGEM SUPERFICIAL NA CIDADE DO RECIFE – PE FRENTE À URBANIZAÇÃO E ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

1 Eduardo Quirino de Mello, 2 Micaella Raíssa Falcão de Moura, 3 Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral
1 Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco - POLI/UPE, e-mail:edu.quirino.mello@gmail.com; 2 Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco - POLI/UPE, e-mail:micaella.raissa@upe.br; 3 Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco - POLI/UPE, e-mail: jaime.cabral@poli.br

Palavras-chave: Chuvas intensas; alagamentos; expansão urbana.

Resumo

O presente estudo teve como objetivo verificar a capacidade hidráulica do sistema de drenagem superficial da Avenida Beira Rio Deputado Osvaldo Coelho, no Recife – PE. Com base no levantamento cadastral fornecido pela Prefeitura da Cidade do Recife (PCR), na análise topográfica da região e na aplicação do Método Racional, foram estimadas as vazões de projeto atuais e futuras, permitindo avaliar o desempenho das bocas-de-lobo e das canalizações existentes. Os resultados mostram que ambos os tipos de dispositivo apresentam capacidade insuficiente para atender às vazões de contribuição, mesmo sob as condições pluviométricas atuais. Em cenários futuros que consideram os efeitos das mudanças climáticas globais e preveem o aumento da intensidade das chuvas, a deficiência tende a se agravar, evidenciando o subdimensionamento da rede e sua baixa capacidade de resposta a eventos extremos. Essas constatações explicam a recorrência de alagamentos na via e confirmam a limitação dos sistemas de drenagem tradicionais frente à expansão urbana e às mudanças do clima. Além disso, o estudo demonstrou a utilidade das ferramentas digitais aplicadas na modelagem e análise hidráulica, contribuindo para o diagnóstico e o planejamento de melhorias na infraestrutura de drenagem urbana recifense.

Introdução

No Brasil, a Lei nº 11.445/2007 estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, incluindo a obrigatoriedade de serviços de drenagem e manejo de águas pluviais que garantam a segurança da população e do patrimônio (Brasil, 2007). No entanto, Recife, capital do estado de Pernambuco, enfrenta sérios problemas relacionados à drenagem urbana, agravados, segundo Preuss *et al*. (2011), pelo elevado crescimento populacional e pela impermeabilização do solo. Em 2013, por exemplo, a Autarquia de Manutenção e Limpeza Urbana do Recife (EMLURB) registrou 159 pontos críticos de alagamento na cidade (Recife, 2013).

O Recife apresenta alta suscetibilidade a enchentes devido a diversas causas: chuvas torrenciais na própria área da cidade; chuvas torrenciais nas áreas mais elevadas das cidades vizinhas; inundações fluviais causadas por precipitações nas bacias hidrográficas dos rios que cortam a capital; marés altas de maior amplitude que alagam territórios mais baixos do município. Logicamente quando ocorre o efeito combinado de mais de uma destas causas, as consequências são muito piores (Cabral e Alencar, 2005).

Em estudo publicado no ano de 2024, o Instituto para a Redução de Riscos e Desastres (IRRD), braço científico da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), concluiu que 44% do território recifense apresenta alta suscetibilidade a inundações. Segundo a instituição, ainda, houve um crescimento considerável no quantitativo de pontos de alagamento desde o ano de 2021. Conforme dito pelo Prof. Dr. Hernande Pereira, coordenador do IRRD/UFRPE, em matéria para a TV Globo, em maio de 2024, tais pontos estão situados em meio à planície costeira, região sobrecarregada pela impermeabilização do solo (Markman, 2024).

Nota-se, portanto, que a metrópole pernambucana possui um longevo e problemático histórico diante das chuvas intensas; segundo Carvalho e Machado (2024, p. 23), "[...] o ano de 1975 foi marcado por uma cheia que atingiu aproximadamente 80% da população do Recife e 25 municípios da bacia do Capibaribe, causando a morte de mais de 100 pessoas". Passadas quase cinco décadas, no ano de 2022, a cidade foi novamente afetada por eventos extremos, que, de acordo com Kobiyama *et al*. (2023), superou em 21,5% o número de vítimas fatais registradas em 1975, totalizando 130 óbitos. Este dado evidencia a severidade do problema e reforça a urgência de ações eficazes no controle e manutenção dos sistemas de drenagem como medida preventiva a inundações e movimentos de terra.

Segundo a Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM), sistemas de escoamento de águas pluviais assumem papel preventivo contra inundações, especialmente em áreas baixas e marginalizadas (Minas Gerais, 2006). Entretanto, no Brasil, diversos sistemas de drenagem apresentam baixa eficiência, afetando os bairros periféricos de maneira mais intensa, justamente por carecerem de infraestrutura adequada de micro e macrodrenagem (Fragoso *et al*., 2016). Os impactos de uma drenagem inadequada são diversos: em adição aos alagamentos e inundações, há prejuízos econômicos, degradação da malha viária e riscos à saúde pública devido à proliferação de doenças de veiculação hídrica (Aires *et al*., 2018; Satiro *et al*., 2019). Em dias de chuvas intensas, que excedem a capacidade de projeto das bocas de lobo, destaca-se riscos à integridade física dos civis, seja por arrastamento pelas águas, ou até por queda em um poço de visita, quando o dispositivo está submerso e destampado ou com a laje danificada (Cabral *et al*., 2025).

De acordo com Elhenawy, Rakha e Ashqar (2021), além de afetar a mobilidade dos transportes, as precipitações intensas colocam em risco tanto a segurança quanto a integridade dos civis no trânsito. O estudo publicado por Rezende *et al*. (2019) demonstra que as chances de acontecer um acidente envolvendo motociclistas aumentam conforme a intensidade das precipitações, podendo evoluir em até 38% no caso de chuvas intensas. Em paralelo, Vianna *et al*. (2018) observaram a variação da velocidade média dos ônibus em um dia de chuva apresentando uma redução de até 31% em comparação à média histórica do percurso.

Nesse sentido, dada a conjuntura da capital pernambucana, a qual é a 16ª cidade mais vulnerável às mudanças climáticas no mundo (IPCC, 2015) identificou-se a necessidade de investigar as condições atuais do sistema de drenagem superficial local, mais especificamente na Avenida Beira Rio Deputado Osvaldo Coelho. A escolha desse objeto de estudo é fundamentada na sua relevância para a mobilidade urbana: localizada entre o Túnel Chico Science e a Ponte Gregório Bezerra, a via é um importante ponto de ligação entre a Zona Norte e a Zona Sul da cidade, recebendo um alto fluxo de veículos diariamente; destaca-se, também, a proximidade da avenida com o Rio Capibaribe, maior e mais relevante curso d'água do Recife. Propõe-se, portanto, garantir o embasamento científico e técnico para uma intervenção adequada e, consequentemente, a prevenção de alagamentos na via estudada e suas proximidades.

Material e Métodos

De início, foi obtida a topografia da Avenida Beira Rio Deputado Osvaldo Coelho e seus arredores através do *Google Earth Pro*, software provido via satélite capaz de fornecer fotos aéreas e dados de elevação. Desse modo, foi possível importar curvas de nível para o *Autodesk Civil 3D*, ferramenta de modelagem tridimensional projetada para engenharia civil, e, posteriormente, gerar uma superfície topográfica. O modelo foi georreferenciado com base no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000). Apresenta-se, na Figura 01, a localidade onde o presente estudo foi realizado.



Figura 01: Locação da área estudada.
Fonte: Autores (2026)

A determinação das vazões de projeto foi realizada através do Método Racional, descrito pela Equação (01), considerando a pequena área de contribuição da via a ser estudada. Segundo Tucci (2012), a aplicabilidade do método é recomendada para bacias hidrográficas inferiores a 2 km². Desse modo, dispensou-se a necessidade de adoção do Método SCS (*Soil Conservation Service*) para efeito de cálculo.

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3{,}6} \qquad (01)$$

Onde: Q é vazão de projeto (m³/s), C é coeficiente de deflúvio, i é intensidade de chuva (mm/h) e A é área de contribuição (km²).

A delimitação da área de contribuição da bacia foi realizada com o auxílio da ferramenta *Autodesk Civil 3D*, por meio do estudo da superfície topográfica gerada, com valor resultante de 41.372,55 m². Posteriormente, a bacia foi dividida em sub-bacias correspondentes a cada trecho da rede de drenagem da Avenida Beira Rio Deputado Osvaldo Coelho. A Figura 01 e Tabela 01 detalham as áreas discretizadas e seus valores, respectivamente.

SUB-BACIA	A (m²)
A1	17.653,71
A2	4.682,84
A3	380,96
A4	4.853,36
A5	9.080,79
A6	1.210,83
A7	733,04
A8	569,84
A9	2.207,18

Tabela 01: Área de contribuição de cada sub-bacia.
Fonte: Autor (2026)

O coeficiente de escoamento superficial/*run-off* (C) foi adotado com base nos valores recomendados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2005). Em razão da predominância de asfalto, concreto e telhados na composição da bacia hidrográfica, atribuiu-se o valor de 0,80 para o coeficiente de deflúvio.

O tempo de recorrência (T_R) seguiu o preconizado pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana de várias cidades (Collischonn e Dornelles, 2021; Teresina, 2011). Em favor da segurança, foi escolhido o tempo de retorno de 10 anos, valor frequente para áreas comerciais e avenidas.

Os tempos de concentração das sub-bacias foram calculados através da Equação de Carter apresentada pela Equação (02). Vale ressaltar que se utilizou a premissa de adoção do valor mínimo de 10 minutos para sistemas urbanos (DNIT, 2006). Os resultados estão descritos na Tabela 02.

$$t_c = 0{,}0977 \cdot L^{0{,}6} \cdot S^{-0{,}3} \quad (02)$$

Onde: t_c é tempo de concentração (h), L é comprimento do talvegue principal (km), S é declividade média do talvegue (m/m).

SUB-BACIA	L (km)	S (m/m)	t_c (h) calculado	t_c (min) calculado	t_c (min) adotado
A1	0,34	0,013	0,19	11,40	11,4
A2	0,10	0,016	0,08	4,96	10
A3	0,04	0,046	0,03	2,04	10
A4	0,10	0,014	0,09	5,39	10
A5	0,13	0,017	0,10	5,78	10
A6	0,07	0,046	0,05	2,96	10
A7	0,04	0,042	0,04	2,30	10
A8	0,03	0,019	0,04	2,45	10
A9	0,16	0,024	0,10	5,93	10

Tabela 02: Determinação do tempo de concentração adotado para cada sub-bacia.
Fonte: Autor (2026)

Computados os valores de T_R e t_c foi possível determinar a intensidade de precipitação por aplicação dos dados fornecidos pelo Sistema Geológico do Brasil (SGB/CPRM; Brasil, 2014) relativos às chuvas intensas e a equação intensidade-duração-frequência (IDF) para a cidade do Recife, apresentada pela Equação (03). Observam-se, na Tabela 03, os resultados obtidos.

$$i = \frac{1423{,}97 \cdot T_R^{0{,}1124}}{(t_c + 21)^{0{,}7721}} \quad (03)$$

Onde: i é intensidade de chuva (mm/h), T_R é tempo de retorno (anos) e t_c é tempo de concentração (min).

SUB-BACIA	T_R (anos)	t_c (min)	i (mm/h)
A1	10	11,4	125,79
A2	10	10	130,14
A3	10	10	130,14
A4	10	10	130,14
A5	10	10	130,14
A6	10	10	130,14
A7	10	10	130,14
A8	10	10	130,14
A9	10	10	130,14

Tabela 03: Cálculo da intensidade de chuva por sub-bacia.
Fonte: Autor (2026)

A fim de verificar, também, a resiliência do sistema frente às mudanças climáticas, foi estimada a intensidade de chuva futura através dos recursos apresentados por Rodrigues *et al*. (2024), em estudo que atualizou as curvas IDF do município considerando o impacto das possíveis alterações no clima até o ano de 2100. As equações IDF, Equação (04) e Equação (05), e suas representações gráficas estão descritas na Tabela 04 e na Figura 02, respectivamente.

MIROC6 - Cenário SSP 2-4.5 (2015-2100)		MIROC6 - Cenário SSP 5-8.5 (2015-2100)	
$i = \frac{1010{,}33 \cdot T_R^{0{,}176}}{(t_c + 9{,}215)^{0{,}707}}$	**(04)**	$i = \frac{962{,}463 \cdot T_R^{0{,}18}}{(t_c + 9{,}217)^{0{,}707}}$	(05)

Tabela 04: Equação IDF de acordo com o MCG MIROC6 para os cenários SSP 2-4.5 e 5-8.5 para o período entre 2015 e 2100.
Fonte: Adaptado de Rodrigues *et al.* (2024)

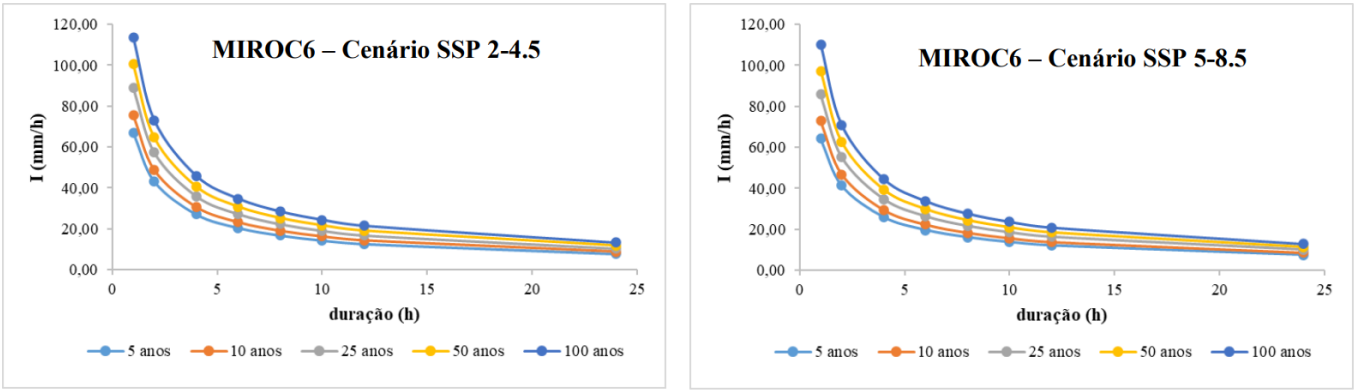


Figura 02: Curvas IDF desenvolvidas para Recife – PE usando dados de precipitação projetada do modelo MIROC6.
Fonte: Rodrigues *et al.* (2024)

Para a estimativa das intensidades de chuva, foram considerados tanto o cenário SSP 2-4.5 quanto o SSP 5-8.5, visando o resultado mais pessimista. Portanto, conforme os valores apresentados na Tabela 05, optou-se pela intensidade pluviométrica resultante do cenário SSP 2-4.5, em detrimento à segurança e resiliência da rede de drenagem analisada frente aos futuros desafios advindos das mudanças climáticas.

SUB-BACIA	T_R (anos)	t_c (min)	i (mm/h)	
			SSP 2-4.5	SSP 5-8.5
A1	10	11,4	178,40	171,51
A2	10	10	187,47	180,23
A3	10	10	187,47	180,23
A4	10	10	187,47	180,23
A5	10	10	187,47	180,23
A6	10	10	187,47	180,23
A7	10	10	187,47	180,23
A8	10	10	187,47	180,23
A9	10	10	187,47	180,23

Tabela 05: Cálculo da intensidade de chuva por sub-bacia para cenários futuros.
Fonte: Autor (2026)

Definidas todas as variáveis necessárias, foi possível determinar a vazão de projeto, tanto atual quanto futura, para cada trecho da rede. Os resultados obtidos da aplicação do Método Racional estão apresentados na Tabela 06.

SUB-BACIA	C	i (mm/h)	A (km²)	Q (l/s)		
				ATUAL	FUTURA	ACRÉSCIMO
A1	0,80	125,79	0,0177	493,48	699,86	41,82%
A2	0,80	130,14	0,0047	135,43	195,09	44,05%
A3	0,80	130,14	0,0004	11,02	15,87	44,05%
A4	0,80	130,14	0,0049	140,36	202,19	44,05%
A5	0,80	130,14	0,0091	262,62	378,30	44,05%
A6	0,80	130,14	0,0012	35,02	50,44	44,05%
A7	0,80	130,14	0,0007	21,20	30,54	44,05%
A8	0,80	130,14	0,0006	16,48	23,74	44,05%
A9	0,80	130,14	0,0022	63,83	91,95	44,05%

Tabela 06: Determinação das vazões de projeto.
Fonte: Autor (2026)

Para verificação das dimensões do sistema de drenagem de águas pluviais da Avenida Beira Rio Deputado Osvaldo Coelho, foi apreciada a base de dados do Sistema de Informações Geográficas da Prefeitura do Recife (ESIG, 2025). Além disso, foi realizada uma consulta, em setembro de 2025, a um engenheiro responsável da EMLURB, especialista em drenagem urbana e recursos hídricos. Por fim, o registro foi complementado pela medição dos dispositivos em visita de campo, realizada em outubro de 2025. O sistema é composto por caixas coletoras, com dois modelos de abertura da guia, o maior com dimensões de 90 cm de largura por 15 cm de altura e o menor com 80 cm de largura por 10 cm de altura, além de tubulações em concreto com 400 mm de diâmetro, material que apresenta coeficiente de rugosidade (n) no valor de 0,015 (Chow, 1959).

Foi considerada a distribuição em partes iguais das vazões de projeto de cada sub-bacia em relação ao quantitativo de seus respectivos dispositivos. A vazão atribuída a cada elemento corresponde aos resultados cumulativos de vazão unitária proporcionais aos pontos à montante dos mesmos e à sua própria contribuição.

A verificação hidráulica das bocas-de-lobo foi realizada com base na capacidade de engolimento, dimensionada através de uma simplificação da equação geral para o cálculo da vazão em vertedores, Equação (06). A aplicabilidade da fórmula foi evidenciada por Teresina (2011), considerando o cenário em que a água escoa com altura limitada à abertura da guia. Destaca-se que, a análise comparou a capacidade de captação às vazões unitárias estimadas.

$$Q = 1{,}7 \cdot L \cdot y^{3/2} \quad (06)$$

Onde: Q é vazão de engolimento (m³/s), L é comprimento da soleira (m) e y é altura de água próxima à abertura na guia (m).

Para a verificação das canalizações que compõem o sistema de drenagem foi utilizada uma variação da Fórmula de Chézy-Manning para seções circulares, Equação (07), método renomado por sua larga aplicabilidade e contribuição histórica no desenvolvimento da ciência hidráulica. Destaca-se que, a análise considerou as vazões acumuladas estimadas como a capacidade de escoamento exigida da rede.

$$D = 1{,}55 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{S^{1/2}}\right)^{3/8} \quad (07)$$

Onde: D é diâmetro do conduto (m), Q é vazão da rede (m³/s), n é coeficiente de Manning e S é declividade da rede (m/m).

Resultados e Discussão

De início, observa-se a insuficiência das bocas-de-lobo que compõem o sistema de drenagem de águas pluviais da Avenida Beira Rio Deputado Osvaldo Coelho para o atendimento pleno da contribuição atual proveniente das sub-bacias A2, A4 e A5. Os dispositivos não possuem capacidade de engolimento para garantir a coleta adequada das precipitações. O caso mais crítico foi verificado nos elementos zoneados em A4, que apresentam potencial de captação equivalente a aproximadamente 61% da vazão unitária.

No cenário futuro, a situação é agravada com a falha adicional das estruturas de coleta localizadas na sub-bacia A1. A intensificação de eventos extremos e o consequente aumento das vazões, estimado por Rodrigues *et al*. (2024), deve superar o limite atendido pelas bocas-de-lobo existentes. A ocorrência mais alarmante persiste nos dispositivos de A4, que contam com capacidade de escoamento proporcional a cerca de 43% da vazão unitária. Portanto, é possível afirmar que os quatros trechos da rede em questão (A1, A2, A4 e A5) não apresentam resiliência frente às mudanças climáticas de acordo com os parâmetros adotados na presente pesquisa.

Em concordância com a verificação hidráulica das estruturas de coleta, as canalizações do sistema não foram suficientes às vazões atuais determinadas para as sub-bacias A1, A2, A4 e A5. Os diâmetros calculados foram muito superiores ao valor

obtido em cadastro (400 mm). O cenário mais crítico foi identificado na sub-bacia A1, que, devido a sua elevada contribuição, indicou a necessidade de adoção do diâmetro comercial de 800 mm.

Tal resultado constitui uma provável causa dos frequentes alagamentos no Túnel Chico Science, relatados por Castilho (2022), Cysneiros (2024) e Aprígio (2024). Essa hipótese é admitida com base na saturação da bacia de drenagem da avenida estudada. O acúmulo momentâneo das precipitações gera a elevação da lâmina d'água escoada, ultrapassando o divisor delimitado entre a sub-bacia A1 e o túnel, sobrecarregando a obra de arte especial (OAE).

A análise do diâmetro da rede de acordo com as vazões futuras estimadas acrescenta um agravante à problemática: além das quatro sub-bacias já mencionadas, observou-se falha na A9. A tubulação a jusante da última caixa coletora não é suficiente para cumprir o papel de deságue no Rio Capibaribe. Outro ponto relevante é a evolução do cenário crítico (A1), que indicou a necessidade de adoção do diâmetro comercial de 1000 mm. Esse resultado reafirma a falta de resiliência do sistema às precipitações esperadas até 2100.

Essa previsão é consideravelmente pior do que a situação atual, pois o acúmulo do escoamento nas adjacências da Ponte Gregório Bezerra representa falha do sistema de drenagem nas duas extremidades da avenida. Nesse cenário, elimina-se qualquer possibilidade de alívio da lâmina d'água por sub-bacias vizinhas que apresentem folga hidráulica, sobrecarregando ainda mais o Túnel Chico Science. Portanto, é esperada a intensificação dos alagamentos na via no decorrer das próximas décadas.

Na visita de campo foi identificada a presença de sedimentos, vegetação e lixo em alguns dispositivos. Segundo Pereira (2015, p. 21) o acúmulo de resíduos sólidos é o principal responsável pela obstrução do sistema coletor de águas pluviais, "[...] ampliando os efeitos das enchentes e a ocorrência de doenças de veiculação hídrica, além de causar poluição do solo e da água". Portanto recomenda-se a implantação de ecocestos nas caixas de coleta e reforça-se a necessidade frequente de manutenção e limpeza adequadas dos componentes da rede de drenagem.

Por fim, o presente estudo evidencia a suscetibilidade de modelos higienistas à defasagem diante das mudanças climáticas e do desenvolvimento urbano acelerado. Nesse sentido, os SUDS, com princípios baseados no retardo, reservação e infiltração do escoamento, representam uma alternativa viável e eficiente frente a tais desafios. Portanto o investimento em técnicas combinadas, que aliem os sistemas tradicionais existentes a soluções sustentáveis, demonstram ser a melhor prevenção a eventos extremos. Isso, de modo a suprir a demanda hidrológica atual e futura com segurança, evitando a sobrecarga hidráulica das estruturas e garantindo funcionalidade da drenagem pluvial.

Considerações Finais

Em síntese, o presente estudo teve como objetivo verificar a capacidade hidráulica do sistema de drenagem superficial da Avenida Beira Rio Deputado Osvaldo Coelho, no Recife – PE. Através da aplicação do Método Racional, da análise topográfica e do levantamento cadastral disponibilizado pela Prefeitura do Recife, foi possível estimar as vazões de projeto atuais e futuras, bem como avaliar o desempenho das bocas-de-lobo e das canalizações existentes. Desse modo, o objetivo proposto foi alcançado, garantindo uma análise bem fundamentada da condição hidráulica local.

Os resultados indicaram que tanto as bocas-de-lobo quanto as canalizações não possuem capacidade suficiente para atender às vazões de contribuição, mesmo nas condições pluviométricas atuais. Em cenários futuros, considerando o aumento da intensidade das chuvas previsto por Rodrigues *et al.* (2024), a situação tende a se agravar, evidenciando o subdimensionamento da rede e sua baixa resiliência frente a eventos extremos. Tais constatações explicam a recorrência de alagamentos observada na região e reforçam a necessidade de adequação do sistema de microdrenagem.

Conclui-se, portanto, que o sistema de drenagem pluvial da avenida apresenta desempenho insatisfatório e risco elevado de sobrecarga hidráulica. O estudo confirmou a limitação dos métodos tradicionais de drenagem urbana frente às mudanças climáticas e à crescente impermeabilização do solo. Por outro lado, demonstrou-se a aplicabilidade das ferramentas digitais utilizadas na modelagem e análise preliminar, oferecendo subsídios técnicos que podem orientar futuras intervenções e políticas públicas voltadas à melhoria da infraestrutura de drenagem no Recife.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco – POLI/UPE, pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

AIRES, T.; OLIVEIRA, J.; CORDEIRO, D.; PACHECO, L.; SILVA, M.; FREITAS, S. **Degradação do asfalto causado por drenagem urbana ineficiente**. 2018. Repositório Digital Institucional da Associação Educativa Evangélica – Universidade Evangélica de Goiás, Anápolis, GO, 2018.

APRÍGIO, M. Chuva no Recife hoje: Veja onde há pontos de alagamento no Recife, saiba onde mais choveu e confira previsão do tempo para hoje (16/2). **TV Jornal**, 16 de fevereiro de 2024. Disponível em: https://tvjornal.ne10.uol.com.br/noticias/2024/02/15672614-chuva-no-recife-hoje-veja-onde-ha-pontos-de-alagamento-no-recife-saiba-onde-mais-choveu-e-confira-previsao-do-tempo-para-hoje-16-2.html. Acesso em: 28 out. 2025.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 144, n. 5, p. 3-7, 08 jan. 2007.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM. **Atlas Pluviométrico do Brasil**. Porto Alegre, RS, 2014.

CABRAL, J.; ALENCAR, A. **Recife e a Convivência com as Águas**. In: Hydroaid (Itália), PMSS/ Ministério das Cidades. (Org.). Gestão do Território e Manejo Integrado das Águas Urbanas. Brasília: Ministério das Cidades, p. 111-130, 2005.

CABRAL, J.; FIGUEIREDO, A.; CRUZ, F.; SILVA, S. Riscos de acidentes causados pela infraestrutura de drenagem urbana em cidades brasileiras. **Revista de Geociências do Nordeste**, Caicó, RN, v. 11, n. 2, p. 17-28, 2025.

CARVALHO, T.; MACHADO, M. O fantasma da cheia de 1975 desliza em 2022: políticas públicas para a gestão de riscos socioambientais em Recife. **Revista Rural e Urbano**, Recife, PE, v. 9, n. 1, p. 22-39, 2024.

CASTILHO, F. No Recife, túnel vira risco de morte para motorista depois um dia de chuva. **Jornal do Commercio**, 03 de agosto de 2022. Disponível em: https://jc.uol.com.br/colunas/jc-negocios/2022/08/15056647-no-recife-tunel-vira-risco-de-morte-para-motorista-depois-um-dia-de-chuva.html. Acesso em: 28 out. 2025.

CHOW, V. **Open-Channel Hydraulics**. 1 ed. Nova Iorque, EUA: Ed. McGraw-Hill Book Company, 1959.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 3 ed. Porto Alegre, RS: Ed. ABRHidro, 2021.

CYSNEIROS, F. Chuva no Recife: veja pontos de alagamento hoje (16) e onde mais choveu em Pernambuco. **Jornal do Commercio**, 16 de fevereiro de 2024. Disponível em: https://jc.uol.com.br/colunas/mobilidade/2024/02/15672617-chuva-no-recife-veja-pontos-de-alagamento-hoje-16-e-onde-mais-choveu-em-pernambuco.html. Acesso em: 28 out. 2025.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Drenagem de Rodovias**. Ministério dos Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPT. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem**. Ministério dos Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPT. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

ELHENAWY, M; RAKHA, H.; ASHQAR, H. Joint Impact of Rain and Incidents on Traffic Stream Speeds. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2021, n. 1, p. 1-12, Chennai, Índia, 2021.

ESIG. **Sistema de Informações Geográficas da Prefeitura do Recife**. Disponível em: https://esigportal2.recife.pe.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=7f6ee791d4d94be4bcf1d0bb93a162a9. Acesso em: 18 ago. 2025.

FRAGOSO, G.; SILVA, F.; SILVA, J.; ALVES, A.; CARVALHO, B. Planejamento, ordenamento e gestão integrada. Diagnóstico do sistema de drenagem urbana da cidade de Belém, Pará: uma análise dos principais bairros da cidade. **Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental**, Brasília, DF, ano 14, 2016.

IPCC. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Sumário do relatório do IPCC para os tomadores de decisão. Quinto Relatório do Grupo de Trabalho II, 2014. **Impactos, adaptação e vulnerabilidade, WGII AR 5 do Quinto Relatório Trad. Iniciativa Verde**. São Paulo: Instituto HSBC Solidariedade, 2015.

KOBIYAMA, M.; MACIEL, J.; RUOSO, E.; FRANCK, A.; FAGUNDES, M. Lições aprendidas com grandes desastres recentes causados por eventos hidrológicos extremos no Brasil. **Revista Geonorte**, Manaus, AM, v. 14, n. 46, p. 115-142, 2023.

MARKMAN, L. Recife tem quase metade do território com risco alto de inundações e alagamentos. **TV Globo**, 29 de maio de 2024. Disponível em: https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2024/05/29/recife-tem-44percent-do-territorio-com-risco-alto-para-inundacoes-e-alagamentos.ghtml. Acesso em: 25 maio 2025.

MINAS GERAIS. Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais – FEAM. **Orientações básicas para drenagem urbana**. Belo Horizonte, MG, 2006.

PEREIRA, F. **Os desafios entre a drenagem urbana e os resíduos sólidos: o caso de Aracaju/SE**. 2015. Dissertação de Mestrado – Pró-reitoria de Pós-graduação e Pesquisa, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2015.

PREUSS, S.; SILVA, A.; BRAGA, R.; CABRAL, J. Adequação estrutural e ambiental para a drenagem urbana sustentável: o caso do Recife, Pernambuco. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Maceió, AL, ano 19, 2011.
RECIFE. Autarquia de Manutenção e Limpeza Urbana do Recife – EMLURB. Relatório de Andamento do RAP – Caracterização da Área de Influência Direta – AID. **Estudo elaboração dos estudos de concepção para gestão e manejo de águas pluviais e drenagem urbana do Recife**. Recife, PE, 2013.

REZENDE, G.; FORTE, B.; CUNTO, F.; GOMES, M. Influência da precipitação pluviométrica na frequência de acidentes com motocicletas em áreas urbanas. **Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, Balneário Camboriú, SC, ano 33, 2019.

RODRIGUES, A.; FARIAS, V.; ARAUJO, D.; CABRAL, J. Atualização das curvas IDF para Recife no cenário de mudanças climáticas até 2100. **Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, João Pessoa, PB, ano 17, 2024.

SATIRO, R.; LIMA, R.; SOUSA, F.; DUARTE, F. Drenagem urbana de água pluviais: cenário atual do sistema da cidade de Cajazeiras/PB. **Congresso Internacional de Meio Ambiente e Sociedade**, Campina Grande, PB, ano 1, 2019.

TERESINA. Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação – SEMPLAN. Plano Diretor de Drenagem Urbana – PDDrU. **Manual Técnico 3**. Teresina, PI, 2011.

TUCCI, C. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre, RS: Ed. ABRHidro, 2012.

VIANNA, A.; CRUZ, M.; BARBOSA, L.; GAMA, K. Análise do Impacto de Chuvas na Velocidade Média do Transporte Público Coletivo de Ônibus em Recife. **Workshop Brasileiro de Cidades Inteligentes**, Natal, RN, ano 1, 2018.

ANÁLISE DOS EVENTOS EXTREMOS DE TEMPERATURA DO AR E ONDAS DE CALOR EM JOÃO PESSOA-PB (1990–2023)

1 Mateus do Nascimento Rodrigues, 2 Célia Campos Braga, 3 Joaquim José de Sousa Neto , 4 Limara Katharina de Aguiar Silva, 5 Jessica Sousa Dantas

1 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: te.us.13@hotmail.com; 2 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: celiadca@hotmail.com; 3 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: joaquim.sousa@estudante.ufcg.edu.br; 4 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: limarakath@gmail.com; 5 Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: jessicasousaadantas@gmail.com

Palavras-chave: Análise de Ondas de Calor; Climatologia Urbana; João Pessoa.

Resumo

Eventos de calor extremo, incluído Ondas de Calor (OC) são fenômenos meteorológicos caracterizados, como episódios de temperaturas extremas, durante dias consecutivos, impulsionado pelas mudanças climáticas, propiciado pelo aquecimento global. Esses eventos causam riscos importantes principalmente na saúde, além de intensificar os desastres ambientais ou climáticos, tais como, incêndios florestais, secas, ondas de calor, intensificação no consumo de energia, e outros de diversas naturezas. Neste contexto, o objetivo do estudo foi analisar a frequência, duração e intensidade das ondas de OC em João Pessoa – PB, situada no extremo leste do litoral do Nordeste do Brasil. Para isso utilizaram-se dados diários de temperaturas máximas e mínimas oriundos do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET de 1990 a 2023, para calcular os índices de dias com temperatura máxima e mínimas acima dos percentis 90 (TX90p) e 90 (TN90p), utilizando o software RClimDex. Os resultados indicaram um aumento significativo na frequência de noites quentes, com o índice TN90p apresentando em 97,06% dos anos analisados, com uma média de 34,64 dias em OC por ano. Para o TX90p, embora historicamente menos frequente, apresentou um aumento abrupto e alarmante a partir de 2015, atingindo o recorde de 173 dias em OC no ano de 2023. A análise de regressão linear apontou uma tendência de aquecimento significativa nas temperaturas máximas 0,0002 °C/mês, com R = 0,49, enquanto as mínimas apresentam tendencia negativa de - 0,0001°C/mês. Enfim observou-se que a expansão urbana e a redução de áreas verdes na capital paraibana potencializaram o efeito das ilhas de calor locais. A partir dos obtidos pode-se concluir que a cidade apresenta vulnerabilidade crescente ao estresse térmico, reforçando a necessidade de políticas de planejamento urbano resilientes.

Introdução

No atual cenário de mudanças climáticas, as ondas de calor (OC) têm se destacado como um dos principais eventos extremos observados não somente no Nordeste brasileiro, mas em todo mundo, apresentando riscos crescentes à saúde pública, agricultura e segurança alimentar. De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (AR6), mudanças climáticas de origem antrópica alteraram a magnitude e a frequência desses eventos, tornando OC que anteriormente possuíam período de retorno de 50 anos significativamente mais recorrentes (IPCC, 2023). Estudos indicam que eventos relacionados ao calor tendem a se tornar mais frequentes, longos e intensos (PERKINS et al., 2012; BITENCOURT et al., 2016).

Para mitigar a subjetividade na identificação destes eventos, a utilização de limiares percentílicos (PERKINS, 2015) permite uma análise sensível à realidade local, abordagem corroborada pelo estudo de Souza et al. (2025), que utilizou dados do INMET entre 2010 e 2022 para demonstrar um crescimento acentuado na temperatura máxima de João Pessoa a partir de 2015, com médias elevando-se de 30,35°C para 31,25°C no período subsequente. A presente investigação expande essa análise ao utilizar processamento de dados em Python para garantir rigor científico (LOWNDES et al., 2017) e ao destacar o ano de 2023 como um novo recorde de temperatura máxima, validando a tendência de aquecimento urbano e a necessidade de métricas precisas de frequência, duração e intensidade para a caracterização de eventos extremos na capital paraibana.

Estudo realizado por Souza et al. (2025) demonstrou um crescimento acentuado na temperatura máxima de João Pessoa a partir de 2015, com médias elevando-se de 30,35°C para 31,25°C. Rondon (2025) analisou as OC ocorridas em Cuiabá - MT entre os anos de 1961 a 2024, enfatizando sua duração, intensidade e frequência. Para isso, foram utilizados dados diários de temperatura máxima e mínima provenientes da estação meteorológica convencional do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, aplicando-se os índices CTX90pct e CTN90pct, baseados no percentil 90 usando o RClimDex.

A cidade de João Pessoa localizada no estado da Paraíba, caracterizada por um clima tropical quente e úmido (INMET, 2025), enfrenta um processo de urbanização acelerado nas últimas décadas. Segundo Santos (2011) a intensa impermeabilização do solo, a verticalização da orla e a redução da cobertura vegetal contribuíram para o agravamento do efeito de Ilha de Calor Urbana (ICU). Esse fenômeno, potencializado pela alta umidade e pelo bloqueio da brisa marítima por barreiras urbanas, eleva o desconforto térmico da população mesmo em períodos de temperaturas moderadas (SANTOS, 2011). Investigações prévias no microclima local revelaram variações térmicas de até 6ºC em bairros densos devido à substituição da vegetação por superfícies impermeáveis (SANTOS, 2011).

Diante desse contexto, o objetivo deste estudo foi realizar uma análise estatística descritiva e exploratória das ondas de calor para a cidade de João Pessoa, abrangendo o período de 1990 a 2023, fornecendo subsídios para estratégias de adaptação urbana frente ao aquecimento global.

Materiais e Métodos

1. Área de Estudo e Dados

O estudo foi conduzido para a cidade de João Pessoa, capital da Paraíba (07°06'54" S; 34°51'47" W), que apresenta clima tropical com verão seco (As), segundo a classificação de Köppen-Geiger (KÖPPEN; GEIGER, 1936). A região tem passado por um processo acelerado de urbanização e verticalização, resultando na substituição de vegetação nativa por superfícies impermeáveis, o que intensifica o efeito de Ilha de Calor Urbana (ICU) (SANTOS, 2011; FERNANDES; LIMA, 2022).

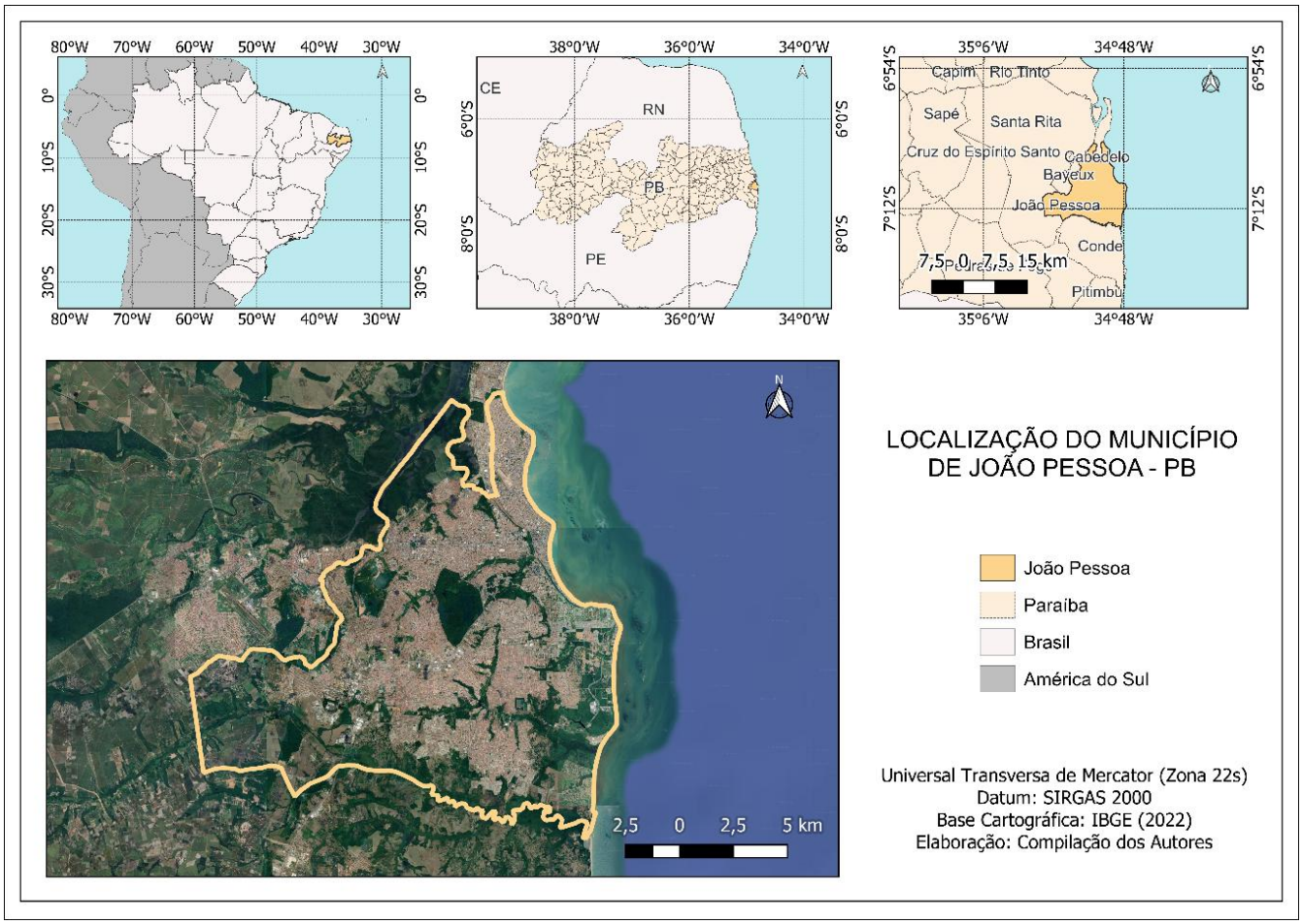


Figura 25: Localização do município de João Pessoa (PB). Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Foram utilizadas séries históricas diárias de temperatura máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}) oriundas da estação meteorológica convencional de João Pessoa (OMM: 82798), disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia. O período analisado compreende os anos de 1990 a 2023. Para a definição dos limiares, adotou-se a normal climatológica de referência de 1991–2020, conforme as diretrizes da Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2017).

2. Metodologia

A metodologia utilizada para a identificação das OC fundamenta-se no cálculo de índices de extremos térmicos por meio de limiares percentílicos que persistem por dias consecutivos. Em conformidade com a abordagem de Siqueira (2024), foram processados os índices de dias com temperatura máxima acima do percentil 90 (TX90p) e temperatura mínima acima do percentil 90 (TN90p), utilizando o software RClimDex. Esta parametrização permite capturar a persistência e a intensidade das anomalias térmicas em João Pessoa, seguindo as definições estabelecidas pelo *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI), o que garante a padronização estatística necessária para a detecção de eventos extremos de calor (SIQUEIRA, 2024; ZHANG; YANG, 2004). Seguindo a abordagem aplicada por Siqueira (2024) para a análise de séries térmicas no contexto regional. A técnica baseia-se na identificação de eventos onde as temperaturas superam um limiar percentílicos específico por dias consecutivos. Para a caracterização das ondas de calor em João Pessoa, foram utilizados os índices TX90p (frequência de dias com temperatura máxima acima do percentil 90) e TN90p (frequência de dias com temperatura mínima acima do percentil 90), processados através do software RClimDex. O processamento dos dados foi realizado em linguagem Python para organização das séries e, posteriormente, no software RClimDex para o cálculo dos índices de extremos climáticos, seguindo a metodologia do *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI) (ZHANG; YANG, 2004).

Tabela 1 - Definição de eventos de Onda de Calor segundo o índice TX90p e TN90p.

Índice	Definição de Onda de Calor (OC)
TX90p	Período com duração de três ou mais dias consecutivos, caracterizado por temperaturas máximas diárias superiores ao limiar definido pelo índice.
TN90p	Período com duração de três ou mais dias consecutivos, caracterizado por temperaturas mínimas diárias superiores ao limiar definido pelo índice.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Foram adotados os índices baseados em limiares percentílicos para capturar anomalias térmicas diurnas e noturnas (Tabela 2).

Tabela 2. Definição dos índices e critérios para Ondas de Calor (OC).

Índice	Definição do Limiar	Critério de Onda de Calor (OC)
TX90p	Dias com T_{max} > percentil 90	Mínimo de 3 dias consecutivos com T_{max} acima do limiar.
TN90p	Dias com T_{min} > percentil 90	Mínimo de 3 dias consecutivos com T_{min} acima do limiar.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Para mitigar a variabilidade sazonal, utilizou-se uma janela móvel de 5 dias para o cálculo dos percentis (PERKINS; ALEXANDER, 2013). Por fim, a tendência e a relação linear entre as séries temporais foram avaliadas por meio do Coeficiente de Correlação de Pearson ($\boldsymbol{r}$) e do Coeficiente de Determinação ($\boldsymbol{R^2}$) (WILKS, 2006).

$$\boldsymbol{r} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{x}-\overline{\boldsymbol{x}})(\boldsymbol{y}-\overline{\boldsymbol{y}})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{x}-\overline{\boldsymbol{x}})^2][\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{y}-\overline{\boldsymbol{y}})^2]}} \quad (1)$$

Onde: X é as variáveis observadas, Y é as variáveis simuladas a partir da metodologia proposta e N é o número de observações.

Resultados e Discussão

1. Frequência e Distribuição das Ondas de Calor (OC)

A análise das OC em João Pessoa (1990-2023) na Figura 1, revela uma transição nítida no regime de extremos térmicos. Enquanto as noites excessivamente quentes (TN90p) são uma constante cronificada, ocorrendo em 97,06% dos anos analisados com média de 7,71 eventos/ano, o calor extremo diurno (TX90p) demonstrou um crescimento abrupto e persistente apenas a partir de 2015.

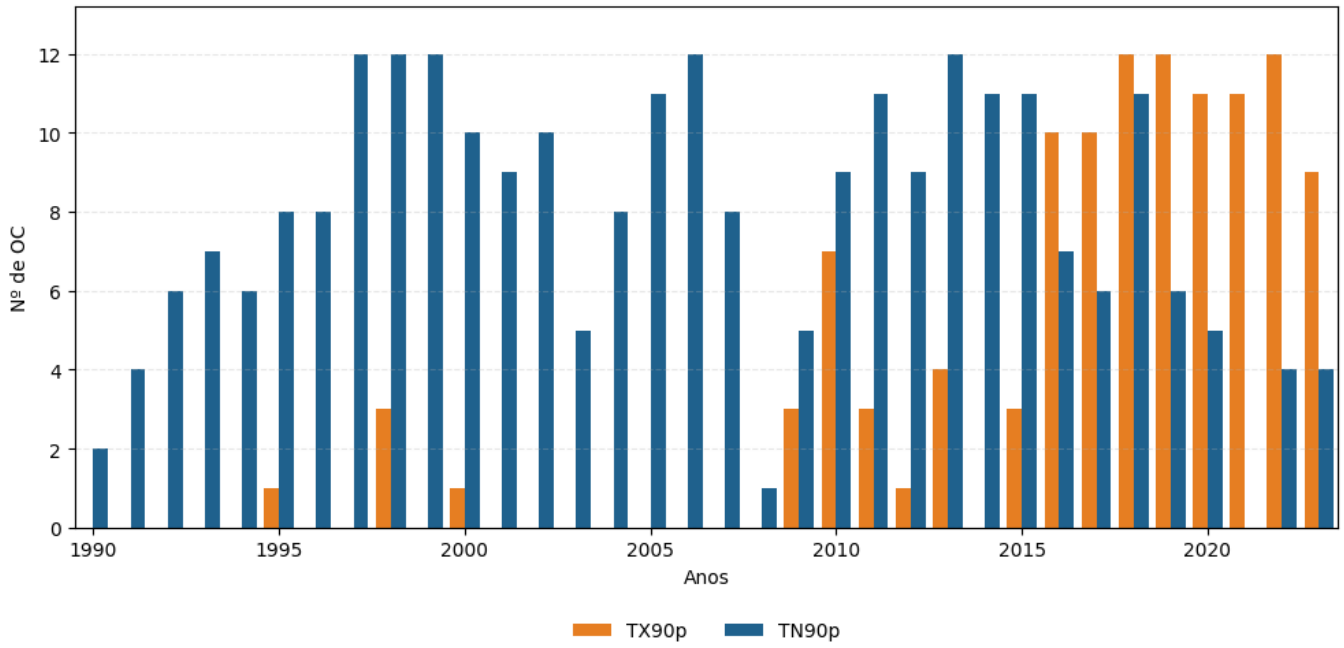


Figura 01: Número anual de OC para os índices TX90pct e TN90pct. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Até 2014, o índice TX90p manifestava-se de forma esporádica. Contudo, entre 2018 e 2023, este índice passou a dominar a série, atingindo o teto de 12 ocorrências anuais (Tabela 2). Esse comportamento sugere uma quebra de padrão climático na capital, onde o estresse térmico diurno tornou-se tão frequente quanto o noturno.

Tabela 2. Estatísticas comparativas das OC em João Pessoa (1990-2023).

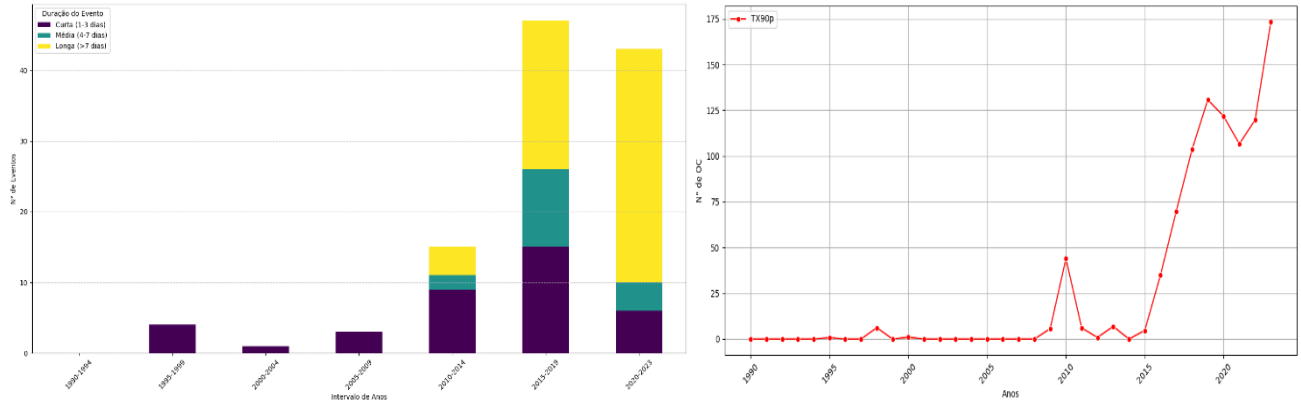
Índice	Média Anual	Desvio Padrão	% Anos com OC	Nº Máx. (Ano)
TX90p	3,32	4,55	50,00%	12 (2022)
TN90p	7,71	3,37	97,06%	12 (2006)

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

2. Duração, Severidade e Sazonalidade

Observa-se na Figura 1a uma tendência de prolongamento das OC. Historicamente, os eventos eram majoritariamente curtos (1-3 dias). Entretanto, a partir de 2015, os eventos "Longos" (>7 dias) passaram a dominar a estatística para o índice TX90p. Destaca-se que o evento diurno mais longo atingiu 24,82 dias consecutivos, superando o recorde noturno de 18,68 dias.

Quanto ao volume total de dias sob condição de OC (Figura 1b), o ano de 2023 registrou um recorde alarmante de 173 dias para o índice TX90p, significando que a cidade esteve sob calor extremo diurno em quase 47% do ano. Sazonalmente, tanto o TX90p (30,97%) quanto o TN90p (30,92%) apresentam ápice durante o inverno (JJA), indicando que o estresse térmico em João Pessoa é um fenômeno perene e não restrito ao verão.



(a) **(b)**

Figura 02: (a) Classificação por severidade de duração e (b) Total anual de dias sob condição de OC para o índice TX90p em João Pessoa (1990-2023). Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3. Intensidade e Tendência Linear

A intensidade das OC, medida pela anomalia térmica acima do percentil 90, exibe um crescimento vertical drástico para o calor diurno na última década, superando 4,5 °C em anos como 2019, 2020 e 2023. Esse comportamento reforça que, embora o calor noturno seja um componente persistente no clima de João Pessoa, os eventos de calor diurno tornaram-se severamente mais intensos na última década, atingindo picos de anomalia térmica que superam significativamente os registros das temperaturas mínimas.

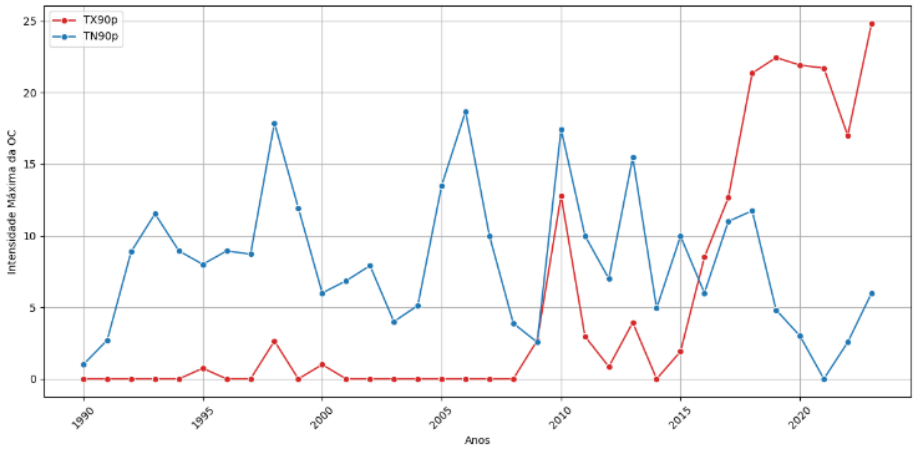


Figura 02: Evolução da intensidade máxima anual das OC em João Pessoa (1990-2023). Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A análise de tendência das médias mensais confirma essa agressividade diurna: a T_{max} apresenta uma inclinação ascendente de 0,0002 °C/mês ($R^2 = 0,24$), enquanto a T_{min} sinaliza estabilidade ($R^2 = 0,02$). Esse contraste estatístico reforça que o aquecimento em João Pessoa é impulsionado prioritariamente pela elevação das temperaturas máximas, intensificando o desconforto térmico da população.

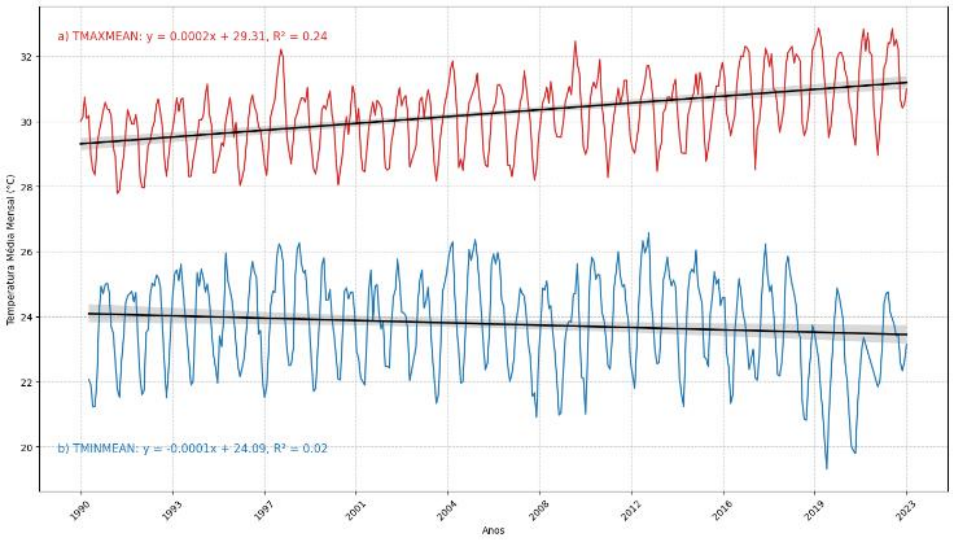


Figura 26: Tendência linear das médias mensais de a) temperatura máxima e b) mínima em João Pessoa (1990–2023). Fonte: Elaborado pelos autores.

Considerações Finais

A análise estatística dos extremos térmicos em João Pessoa entre 1990 e 2023 permitiu identificar uma transformação significativa no comportamento das ondas de calor (OC) na capital paraibana. Os resultados permitem concluir que:

O calor noturno (TN90p) atua como uma característica crônica do microclima local, apresentando uma frequência constante ao longo de toda a série histórica, com ocorrência em mais de 97% dos anos analisados e ápice durante os meses de inverno.

Houve uma ruptura de padrão no regime térmico diurno (TX90p) a partir de 2015. O que antes era um fenômeno episódico e de curta duração evoluiu para eventos severos de extrema persistência, culminando no recorde de 2023, onde quase 47% do ano foi classificado sob condição de OC.

A intensificação das ondas de calor diurnas é evidenciada não apenas pela frequência, mas pela severidade (eventos com mais de 24 dias consecutivos) e intensidade (anomalias superiores a 4,5 °C), enquanto as temperaturas mínimas apresentam um cenário de estabilidade estatística.

Este estudo evidencia que João Pessoa enfrenta um "novo normal" climático, onde a combinação de noites cronicamente quentes com a recente explosão de calor extremo diurno impõe riscos severos à saúde pública e à resiliência urbana. Tais achados reforçam a urgência de políticas de planejamento urbano que considerem o estresse térmico crescente como um fator crítico para a adaptação da cidade às mudanças climáticas globais e locais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao INMET pela disponibilização dos dados e à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pelo suporte acadêmico.

Referências Bibliográficas

BITENCOURT, D. P.; FUENTES, M. V.; MAIA, P. A.; AMORIM, F. T. Frequência, Duração, Abrangência Espacial e Intensidade das Ondas de Calor no Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 31, n. 4, p. 506-517, 2016.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Normais Climatológicas do Brasil. Brasília, DF, 2025. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br. Acesso em: 26 fev. 2026.

FERNANDES, Helder Formiga; LIMA, Eduardo Rodrigues Viana de. Temperatura da superfície e cobertura vegetal da Cidade de João Pessoa-PB. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 9, n. 23, p. 1631-1663, 2022.

IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. 184 p.

LOWNDES, J. S. S. et al. Our path to better science in less time through open data science. Nature Ecology & Evolution, v. 1, n. 6, p. 1-7, 2017.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. Handbuch der Klimatologie. Berlin: Gebrüder Bornträger, 1936. v. 1, cap. C, p. 1-44.

OMM - ORGANIZAÇÃO METEOROLOGICA MUNDIAL. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. WMO-No. 1203. Geneva: World Meteorological Organization, 2017.

PERKINS, S. E. A review on the scientific understanding of heatwaves—Their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale. Atmospheric Research, v. 164, p. 242-267, 2015.

PERKINS, S. E.; ALEXANDER, L. V. On the measurement of heat waves. Journal of Climate, v. 26, n. 13, p. 4500-4517, 2013.

PERKINS, S.E.; ALEXANDER, L.V.; NAIRN, J.R. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. Geophysical Research Letters, v. 39, n. 20, p. 1-5, 2012.

RONDOM; E. P. B.2025 Avaliação da Evolução das ondas de calor na cidade de Cuiabá-MT-Brasil no período de 1961- 2024. Trabalho TCC Universidade Federal de Campina Grande.

SANTOS, Joel Silva dos. Campo térmico urbano e a sua relação com o uso e cobertura do solo em uma cidade tropical úmida. 2011. 182 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

SANTOS, J. S. et al. Análise das condições do conforto térmico em ambiente urbano: estudo de caso em campus universitário. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 4, n. 2, p. 336-353, 2011.

SOUZA, Vladimir Sobral de; ASSIS, Eleonora Sad de; ALBUQUERQUE, Taciana Toledo de Almeida. Caracterização de ondas de calor da cidade de João Pessoa/PB por três diferentes definições. Revista Brasileira de Climatologia, Dourados, MS, v. 37, p. 845-868, jul./dez. 2025. ISSN 2237-8642.

WILKS, Daniel S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. 2. ed. Burlington: Elsevier/Academic Press, 2006. 627 p. (International Geophysics Series, v. 91).

ZHANG, X.; YANG, F. RClimDex (1.0) User Manual. Climate Research Branch Environment Canada, Downsview, Ontario, Canada, p. 22, 2004.

EFEITOS DA SECA DE 2023 - 2024 NO QUILOMBO MURUMURUTUBA, SANTARÉM - PA

1 Glenda Suane Marinho Cavalcante, 2 Juliana da Silva Melo, 3 Diani Fernanda da Silva Less

1 Instituição: Universidade Federal do Oeste do Pará, e-mail: suaneglenda@gmail,com; 2 Instituição: Universidade Federal do Oeste do Pará, e-mail: julianas.melo21@gmail.com; 3 Instituição: Universidade Federal do Oeste do Pará, e-mail: diani.less@ufopa.edu

Palavras-chave: Mudanças climáticas; comunidades tradicionais; Amazônia..

Resumo

A intensificação das mudanças climáticas têm gerado impactos socioambientais profundos na região amazônica, especialmente em comunidades tradicionais que dependem diretamente dos recursos naturais para sua subsistência. Entre esses impactos, destaca-se a escassez hídrica causada por longos períodos de seca. Diante desse cenário, este trabalho busca compreender as consequências da seca de 2023-2024 na comunidade quilombola Murumurutuba, localizada no município de Santarém, Pará. A metodologia utilizada foi qualiquantitativa, com aplicação de questionários com os moradores da comunidade, além de revisão de literatura sobre mudanças climáticas e seus efeitos na Amazônia. Os resultados revelam que a seca tem afetado diretamente a agricultura familiar e o acesso à água potável, sendo os efeitos intensificados pela pesca predatória que contribui para a escassez de peixes, agravando desigualdades sociais e aumentando a dependência de intervenções institucionais. Assim, torna-se essencial fortalecer políticas públicas voltadas às comunidades tradicionais, reconhecendo e adotando o saber local como instrumento estratégico de resistência e adaptação frente aos desafios enfrentados pelas mudanças climáticas..

Introdução

O termo mudanças climáticas refere-se às alterações significativas nos padrões do cenário climático global, provocadas tanto por fatores naturais quanto pela influência humana. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), as liberações de gases de efeito estufa procedentes da queima de combustíveis fósseis, desmatamento e demais modificações antrópicas correspondem às principais atividades responsáveis pelo aquecimento global. Essa elevação de temperatura tem gerado uma sequência de impactos negativos, destacando-se o aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos.

Durante os anos de 2023 e 2024, a região amazônica brasileira vivenciou uma estiagem de maior intensidade nas últimas décadas. Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2024), essa estiagem prolongada foi marcada por temperaturas elevadas, chuvas abaixo da média histórica e redução significativa da vazão do rio Amazonas e seus afluentes. Conforme Nobre et al. (2023) e Silva e Costa (2023), tais ocorrências foram intensificadas por fatores como o fenômeno El Niño, o aquecimento das águas do Atlântico Norte e o avanço do desmatamento, que impactaram diretamente a região.

Os territórios dos povos tradicionais da Amazônia, como quilombolas, ribeirinhos e indígenas, são especialmente vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas, pois dependem diretamente dos recursos naturais para sua sobrevivência (Acselrad, 2020). Almeida (2022) enfatiza que as comunidades quilombolas, além dos recursos naturais, dependem das organizações comunitárias e da preservação das referências culturais para resistir a eventos de crise.

O quilombo Murumurutuba, situado no município de Santarém, no Oeste do Pará, enfrentou de maneira intensa os desafios da estiagem prolongada, que comprometeu a segurança alimentar, a geração de renda e o modo de vida da comunidade.

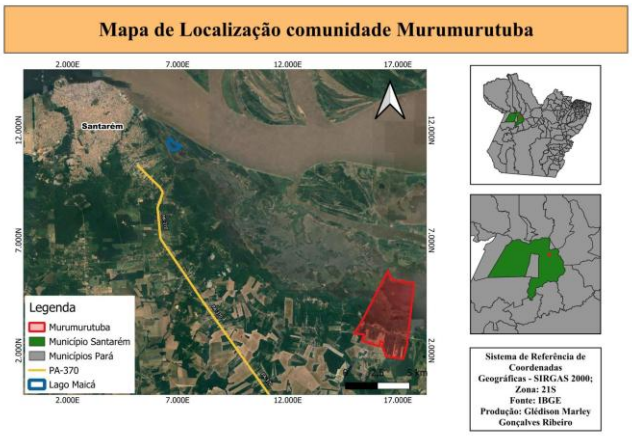
Esse cenário evidencia a importância de investigar e dar visibilidade aos desafios socioambientais relacionados aos eventos extremos vivenciados nos territórios tradicionais. Assim, o presente estudo tem como objetivo analisar os impactos socioambientais da seca extrema de 2023 e 2024 na comunidade quilombola Murumurutuba, localizada no município de Santarém (PA), na região do Planalto Santareno.

Material e Métodos

Área de estudo

Este estudo foi realizado no Quilombo Murumurutuba, localizado na região do Planalto de Santarém, Pará, com acesso pela rodovia Curuá-Una, via ramal da comunidade Poço das Antas, passando por Santa Cruz e Aldeia São Francisco da Cavada. A distância até o centro de Santarém é de 47 km, com tempo médio de deslocamento de cerca de 1 hora.

Figura 1 – Localização do Quilombo Murumurutuba.



Fonte: IBGE.

O quilombo possui aproximadamente 314 moradores e 104 famílias, com ancestralidade negra ligada ao período escravocrata. A comunidade é organizada em vilas familiares, como Vila Bentes, Vila Pinto, Vila Pereira, Vila dos Santos, Vila Dolzanes e Vila Almeida, que crescem naturalmente ao longo das gerações.

Figura 2 – A) Escola São Sebastião do Quilombo Murumurutuba; B) Imagem aérea da Vila Pinto.



Fonte: Luan Madson Pinto, 2024.

A comunidade é representada pela Associação Quilombola de Murumurutuba (AQMUS), fundada oficialmente em 2003 e filiada à Federação das Organizações Quilombolas de Santarém (FOQS). Em 2005, obteve certificação como remanescente de quilombo pela Fundação Cultural Palmares. A associação atua como pessoa jurídica de direito privado, sem fins econômicos, com objetivos voltados à garantia de direitos, organização comunitária, administração das terras coletivas e promoção de ações em educação, saúde, cultura e lazer.

Coleta de dados

A pesquisa caracteriza-se como descritiva com abordagem qualiquantitativa. Foi iniciada a partir de um projeto elaborado para a I Exposição de Projetos de Tecnologias Limpas e Gestão de Resíduos.

Para sua realização, foi solicitada autorização via ofício ao presidente da AQMUS e à FOQS. Após anuência das lideranças, foram aplicados questionários estruturados aos moradores da comunidade.

Universo da Pesquisa

O universo da pesquisa abrangeu as famílias residentes na comunidade quilombola rural de Murumurutuba. Essas famílias desempenham papel fundamental na investigação, pois suas experiências e conhecimentos tradicionais são essenciais para compreender os impactos da seca, da agricultura e da pesca na região.

O questionário foi aplicado online em dezembro de 2024 para 45 entrevistados, construído na plataforma Google Forms, com 17 perguntas abordando:

1. Intensidade e frequência das secas;
2. Impactos na agricultura e disponibilidade de água;
3. Problemas enfrentados pelos pescadores;
4. Importância da pesca e tipos de embarcações;

5. Redução da quantidade de peixes e espécies escassas;
6. Papel do conhecimento tradicional no manejo dos recursos naturais;
7. Presença da pesca predatória e medidas de combate;
8. Benefícios esperados com políticas contra seca e pesca predatória;
9. União da comunidade frente aos desafios;
10. Uso de tecnologias para melhorar a pesca e enfrentar a seca.

Análise dos dados

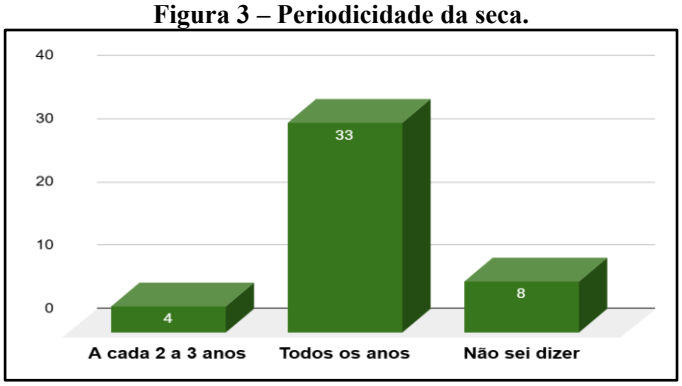
As respostas foram sistematizadas em tabelas e gráficos, permitindo analisar os impactos da seca na agricultura, na escassez de água e nas dificuldades enfrentadas pelos pescadores. Além disso, buscou-se compreender como o conhecimento tradicional está sendo aplicado para superar as dificuldades impostas pela estiagem.

Resultados e discussões

A análise das informações obtidas por meio dos questionários permitiu compreender os impactos da seca na comunidade, fornecendo base para avaliar sua vulnerabilidade às mudanças climáticas e discutir estratégias de adaptação.

A maioria dos entrevistados relatou que o Quilombo enfrenta desafios relacionados à seca **anualmente**. Já 17,8% não souberam responder e 8,9% afirmaram que secas intensas ocorrem em intervalos de dois a três anos (**Figura 3**).

Figura 3 – Periodicidade da seca.



Eventos históricos de secas severas foram registrados em 1912, 1925, 1964, 1980, 1983, 1997/1998, 2005 e 2010, além de episódios recentes em 2015, 2016, 2020 e 2023/2024. Em 2023, por exemplo, os 62 municípios do Amazonas declararam estado de calamidade pública, afetando cerca de 598 mil habitantes.

Na pesquisa, **88,9% dos participantes** afirmaram que as secas têm se tornado mais intensas e frequentes nos últimos anos. A diferença significativa da vazão do rio Maicá entre junho (cheia) e dezembro (seca extrema) de 2024 pode ser observada na **Figura 4**.

Figura 4 – A) Vazão alta do rio Maicá em junho/2024; B) Rio Maicá seco em dezembro/2024.

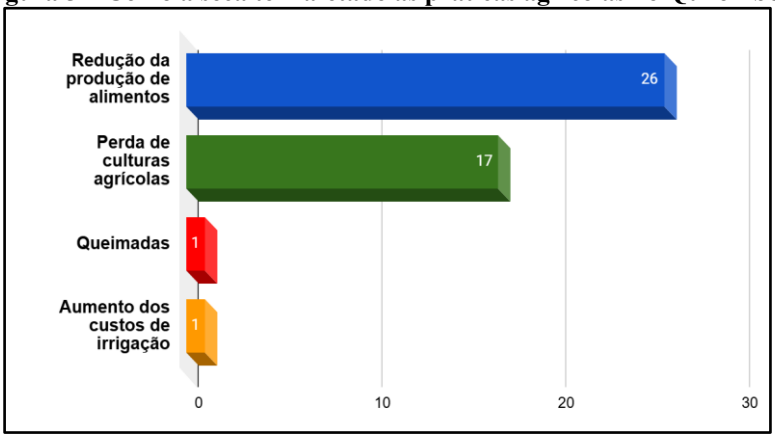


Fonte: Acervo pessoal, 2025.

Os entrevistados consideraram a seca extrema como fator que impacta negativamente a produção de alimentos:

- 57,8% afirmaram redução da produção agrícola;
- 37,8% apontaram perda de culturas;
- 2,2% mencionaram aumento dos custos de irrigação;
- 2,2% destacaram queimadas associadas à seca (**Figura 5**).

Figura 5 – Como a seca tem afetado as práticas agrícolas no Quilombo?



Na **Figura 6**, observa-se a mortalidade de açaizeiros e cacaueiros durante a seca de 2024, confirmando que o estresse hídrico comprometeu a produção agrícola.

Figura 6 – Comprometimento e mortalidade de açaizeiros (A e B) e cacaueiros (C e D).



Fonte: Acervo pessoal, 2025.

Além disso, **46,7% dos entrevistados** apontaram escassez de água potável e outros 46,7% destacaram comprometimento da qualidade da água. A dessedentação de animais também foi afetada, como mostra a **Figura 7**.

Figura 7 – Animais na várzea em tempo de seca.



Fonte: Acervo pessoal, 2024.

Mais de **51,1% dos entrevistados** afirmaram que a principal dificuldade durante a seca é a navegação nos rios, enquanto 48,9% destacaram a diminuição da quantidade de peixes. A diferença entre seca (dezembro/2024) e cheia (julho/2025) é mostrada na **Figura 8**.

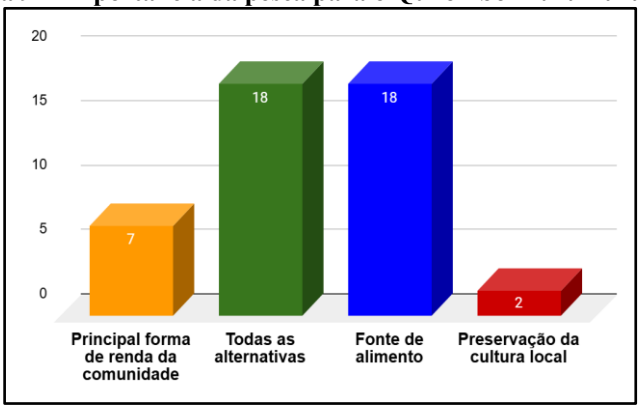
Figura 8 – A) Seca do rio em dezembro/2024; B) Cheia em julho/2025.



Fonte: Acervo pessoal, 2024; Rafaela Pinto, 2025.

A pesca foi considerada essencial por 40% dos entrevistados como fonte de alimento, 15,6% como principal forma de renda e 4,4% como preservação cultural. Outros 40% apontaram que reúne todas essas funções (**Figura 9**).

Figura 9 – Importância da pesca para o Quilombo Murumurutuba.



Quanto às embarcações, **88,9% utilizam canoas simples** e 11,1% barcos com motor rabeta (**Figura 10**).

Figura 10 – A) Canoas simples; B) Canoas com motor rabeta.



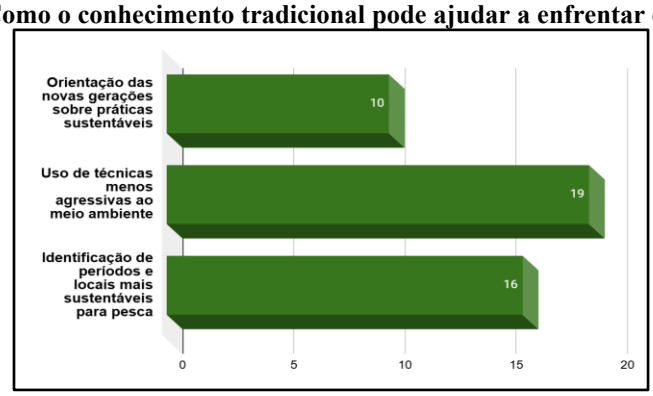
Fonte: Acervo pessoal, 2024.

A redução da quantidade de peixes foi percebida por **86,7% dos entrevistados**, refletindo a degradação dos ecossistemas aquáticos. Espécies como pirarucu, tambaqui, curimatã e tucunaré tornaram-se escassas.

Os moradores destacaram que o **conhecimento tradicional** sobre pesca e manejo dos recursos naturais é essencial para enfrentar os problemas.

• 43% apontaram técnicas menos agressivas ao meio ambiente;
• 35,6% destacaram identificação de períodos e locais sustentáveis;
• 22,2% ressaltaram a importância de orientar novas gerações (**Figura 12**).

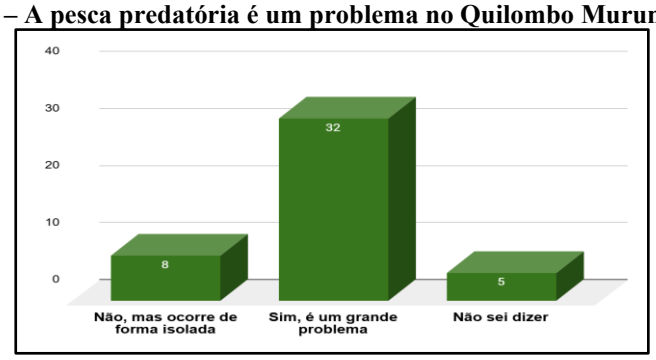
Figura 12 – Como o conhecimento tradicional pode ajudar a enfrentar os problemas?



A maioria dos entrevistados (**71,1%**) considera a pesca predatória um problema significativo. Os métodos mais citados foram:

- uso de redes de arrasto (80%);
- pesca durante o período de reprodução (20%) (**Figura 13**).

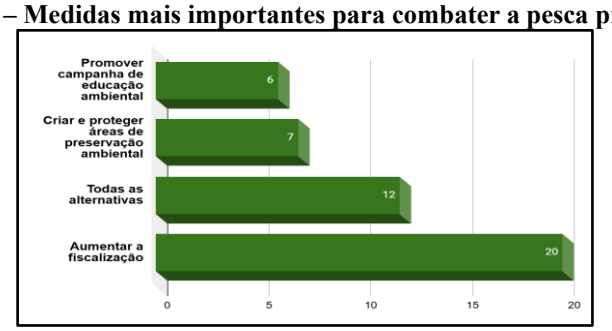
Figura 13 – A pesca predatória é um problema no Quilombo Murumurutuba?



Entre as medidas apontadas para enfrentar a pesca predatória e os efeitos da seca:

- 44,4% defendem aumento da fiscalização;
- 15,6% sugerem criação de áreas de preservação;
- 13,3% destacam campanhas de educação ambiental;
- 26,7% acreditam que todas essas alternativas combinadas são essenciais (**Figura 14**).

Figura 14 – Medidas mais importantes para combater a pesca predatória.



Além disso, **57,8% dos moradores** afirmaram que a comunidade demonstra união para enfrentar os desafios, embora ainda existam dificuldades na coordenação de ações coletivas.

Comentários finais

O estudo apresentado dedicou-se a compreender os impactos da seca ocorrida nos anos de 2023 e 2024 no Quilombo Murumurutuba, por meio da aplicação de formulários e análise dos dados coletados. Foi possível diagnosticar variados efeitos da estiagem intensa nos aspectos ambientais, sociais, culturais e econômicos da comunidade.

A percepção da maioria dos entrevistados é que a seca tem se tornado mais frequente e severa nos últimos anos. Os impactos desse fenômeno prejudicaram diretamente a produção agrícola, comprometendo hábitos alimentares e aumentando os gastos com irrigação. Além disso, a pesca, principal atividade para a segurança alimentar e essência cultural da comunidade, foi drasticamente afetada pela redução do pescado, pela dificuldade de navegação nos rios e pelo agravamento da pesca predatória.

Evidenciou-se também a vulnerabilidade da comunidade diante da redução da disponibilidade e da qualidade da água, o que impactou atividades domésticas e a dessedentação de animais.

Apesar das dificuldades ambientais e sociais, os resultados demonstram a importância da organização comunitária e da valorização dos saberes tradicionais como estratégias de resistência e adaptação à crise climática.

A partir das informações analisadas, amplia-se a compreensão dos impactos socioambientais da seca extrema na Amazônia, especialmente nas comunidades quilombolas, e evidencia-se a urgência de políticas públicas de segurança hídrica e alimentar direcionadas a essas comunidades. Tais políticas devem considerar as características territoriais e ser construídas de forma participativa, com base nos saberes locais.

Com isso, espera-se que esta pesquisa contribua para o planejamento e implantação de medidas de adaptação e para o fortalecimento territorial do Quilombo Murumurutuba, bem como de outras comunidades que também enfrentam os efeitos da crise climática.

Agradecimentos

Aos nossos professores, por cada ensinamento ao longo dessa caminhada. Em especial, à nossa orientadora, pela paciência e olhar atento que foram fundamentais para a construção deste trabalho.

Aos moradores e lideranças do Quilombo Murumurutuba, pelo apoio e colaboração ao longo do desenvolvimento desta pesquisa. A participação de vocês foi essencial para que esta construção fosse rica em saberes.

Referências Bibliográficas

ACSELRAD, Henri. Mudanças climáticas e vulnerabilidade social. Rio de Janeiro: FASE, 2020.

ALMEIDA, Alfredo Wagner Berno de. *Quilombolas e desafios ambientais na Amazônia*. Belém: UFPA, 2022.

ALTIERI, Miguel A.; NICHOLLS, Clara I. Agroecologia e estratégias de adaptação às mudanças climáticas. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 15, n. 2, p. 45–62, 2020.

BRASIL. Decreto nº 6.040, de 7 de fevereiro de 2007. Institui a Política Nacional de Desenvolvimento Sustentável dos Povos e Comunidades Tradicionais. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 fev. 2007.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente.

CEMADEN. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Relatório sobre a seca de 2023. Brasília, 2023.

DIMARI, Anderson M. et al. O impacto das mudanças climáticas nas comunidades vulneráveis. *Revista FT*, v. 28, n. 137, 2024.

FIOCRUZ. *Mudanças climáticas e saúde: doenças transmitidas por mosquitos e impactos em populações vulneráveis*. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2023.

GAMA, Guilherme. Seca no Amazonas: 112 mil pescadores são impactados. *CNN Brasil*, São Paulo, 7 out. 2023.

GREENPEACE Brasil. *Por que lutar por justiça climática?* 2024.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Monitoramento dos níveis hidrológicos na Amazônia – Boletim Anual 2023*. São José dos Campos: INPE, 2024.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers*. Geneva: IPCC, 2023.

OLIVEIRA, Manuela. Consumo de pescado no Pará é quase quatro vezes maior que a média brasileira. *FAPESPA*, Belém, 5 mar. 2024.

PYL, Bianca. Comunidades quilombolas enfrentam os desafios persistentes da seca na Amazônia. *Le Monde Diplomatique Brasil*, 9 abr. 2024.

RAMOS, Maria Eduarda Fonseca. *Efeitos da seca extrema na saúde pública: um estudo na comunidade Paissandu*. Santarém: UFOPA, 2025.

ROCHA, Ilcleane de Souza; ANDRADE, Cristiane Menezes Guedes de; REZENDE, Marília Gabriela Gondim. Estratégias para mitigação dos impactos relacionados à seca extrema na vida rural amazônica. *Caderno Pedagógico*, v. 21, n. 9, 2024.

SAMPAIO, Rodrigo A. Regularização fundiária e vulnerabilidade socioambiental em comunidades ribeirinhas da Amazônia. *Revista Amazônica de Geografia*, v. 12, n. 1, p. 85–102, 2018.

SANTOS, Geraldo Mendes dos; SANTOS, Ana Carolina Mendes dos. Sustentabilidade da pesca na Amazônia. *Estudos Avançados*, v. 19, n. 54, p. 165–182, 2005.

SOUZA, Joice Silva de. Pesca predatória. *InfoEscola*, s.d.

ZOGAHIB, André Luiz Nunes. Mudanças climáticas e seus impactos nas cidades: estudo de caso do fenômeno da seca no Estado do Amazonas. *Research, Society and Development*, v. 13, n. 9, 2024.

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PLANEJAMENTO URBANO: ANÁLISE DE CONTEÚDO SOBRE ADAPTAÇÃO E RESILIÊNCIA NOS PLANOS DIRETORES

1 Elisa de Almeida Couto, 2 Paulo Nascimento Neto, 3 Luciene Pimentel da Silva
1 Programa de Pós-Graduação em Gestão Urbana, PUCPR, e-mail: elisadacouto@gmail.com; 2 Programa de Pós-Graduação em Gestão Urbana, PUCPR, e-mail: paulo.neto@pucpr.br; 3 Programa de Pós-Graduação em Gestão Urbana, PUCPR, e-mail: pimentel.luciene@pucpr.br

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Adaptação; Planejamento Urbano

Resumo

Eventos climáticos extremos têm se intensificado e se tornado mais frequentes, exigindo ações de adaptação e fortalecimento de resiliência, especialmente em ecossistemas e comunidades socioambientalmente vulneráveis. Nesse contexto, os governos locais desempenham papel fundamental no enfrentamento às mudanças do clima, dado que os riscos climáticos se apresentam de forma diversa em diferentes territórios, demandando medidas de adaptação específicas para as infraestruturas e populações locais. O presente estudo tem por objetivo investigar como as cidades brasileiras têm incorporado medidas para adaptação e resiliência ao planejamento urbano, por meio da análise de seus Planos Diretores, principal instrumento de planejamento das cidades no país. Foram avaliadas as capitais Curitiba, Fortaleza, Rio de Janeiro, Salvador e São Paulo, escolhidas por integrarem a rede de cidades C40, o que indica o alinhamento dessas cidades com as metas globais de enfretamento à emergência climática. A pesquisa aplicou a análise de conteúdo categorial quantitativa para verificar a frequência com que termos relacionados à adaptação e resiliência eram encontrados nos Planos Diretos das cidades selecionadas, compreendendo uma etapa final de análise do contexto em que tais termos estavam inseridos. Os resultados indicaram, avanços na abordagem da ação climática nos Planos Diretos mais recentes, apontando para a crescente capacitação do corpo técnico nesses municípios e a tendência de evolução na incorporação das mudanças climáticas como pauta transversal ao desenvolvimento das cidades. No entanto, mesmo nas cidades analisadas neste recorte, foi observada a ausência de instrumentos normativos capazes de garantir a efetiva implementação das ações previstas. Estas deficiências evidenciam o desafio da inserção da agenda climática nas cidades brasileiras, principalmente em municípios de menor porte e com menor capacidade técnica e financeira.

Introdução

As mudanças do clima e o decorrente aumento na frequência de eventos extremos tais como secas, inundações, ondas de calor e o aumento do nível do mar, tem afetado profundamente a qualidade de vida urbana e demandado medidas integradas de adaptação e construção da resiliência das comunidades e infraestruturas (Lin *et al.,* 2021).

Adaptação e resiliência não são sinônimos, mas conceitos complementares que precisam estar aliados no enfrentamento da crise climática e na mitigação dos seus impactos. No contexto da emergência climática, a adaptação consiste no processo de ajuste dos sistemas humanos ou naturais aos extremos climáticos esperados para um possível novo normal, enquanto a resiliência corresponde à capacidade dos sistemas interconectados lidarem com um distúrbio e se reorganizarem mantendo sua estrutura essencial, sendo um atributo positivo quando mantém a capacidade de adaptação (IPCC, 2023).

As evidências de que as ações de mitigação não têm sido suficientes para conter o avanço do aquecimento global e a tendência de aumento da intensidade e magnitude dos eventos climáticos (Jia *et al.,* 2019), têm feito com que as pautas da adaptação e resiliência ganhem cada vez mais espaço na Agenda internacional, com destaque para o papel fundamental do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e da Agenda dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) nos avanços dos estudos que envolvem adaptação e resiliência climática.

Um aspecto importante da crise climática é que, apesar de seus efeitos ultrapassarem os limites geográficos locais e dos países responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE), seus impactos negativos se intensificam em ecossistemas e sociedades mais vulneráveis, em geral, países em desenvolvimento do Sul Global, e suas comunidades vulneráveis, com menor parcela de contribuição no fenômeno (Hickel, 2020; Zhang *et al.,* 2023; Mikulewicz et al., 2023). Com problemas urbanos históricos e menos recursos, essas nações e comunidades vulneráveis precisam de uma abordagem para adaptação que considerem esta realidade e busquem meios de transpor as barreiras sociopolíticas existentes (Kehler; Birchall, 2021). Neste contexto, o Brasil se configura como um dos países mais vulneráveis às mudanças do clima e, portanto, necessita fortalecer suas estratégias de adaptação que estão orientadas pelo Plano Clima Adaptação até o horizonte de 2035 (Brasil, 2025).

O mesmo caráter heterogêneo do processo de adaptação se manifesta entre diferentes recortes de um mesmo país, uma vez que este engloba as dimensões econômicas, ambientais e sociais de uma localidade ou território e envolve a participação de setores da sociedade que se integram como forma de responder aos riscos locais e proteger um ecossistema específico, sendo, portanto, um fenômeno situado localmente (Granberg; Glover, 2021). Sem desconsiderar agendas transversais que demandam uma governança multinível (Jacobi *et al.*, 2022), esta abordagem permite o entendimento de que a adaptação é uma agenda sobretudo local, uma vez que é nesta escala que os benefícios são obtidos e as ações tomadas (Kyriakopoulos; Sebos, 2023). Dentre os múltiplos atores envolvidos, os governos locais desempenham papel central no desenvolvimento da adaptação

às mudanças climáticas. O poder público é fundamental ao atuar na prevenção, preparação, mitigação, resposta e recuperação a eventos extremos em diversas frentes como planejamento urbano, infraestrutura, serviços de emergência, saúde e educação para gestão e redução dos riscos de desastres (Granberg; Glover, 2021). Portanto, o que vai determinar o ritmo e o nível da adaptação das cidades é a capacidade institucional de seus governos (Cid; Lerner, 2023).

No intuito do fortalecimento da capacidade dos governos municipais no enfrentamento às mudanças climáticas e do compartilhamento de conhecimento e aprendizagens, foram desenvolvidas iniciativas como a rede de cidades C40 (Lee; van de Meene, 2012; Drumont; Almeida; Nascimento, 2023) composta por quase 100 cidades que lideram as ações climáticas globais. Até o momento, cinco cidades brasileiras integram esta rede: Curitiba, Fortaleza, Rio de Janeiro, Salvador e São Paulo (C40, [s.d.]). Com exceção de Fortaleza, que passou a integrar a rede em 2024 (Fortaleza, 2024), estas cidades receberam apoio para elaboração de seus Planos de Ação Climática, lançados entre 2020 e 2021, por meio programa Deadline 2020 do C40 (ICLEI, 2020).

No Brasil, o principal instrumento de planejamento urbano nas cidades é o Plano Diretor, portanto a forma como a lei de cada município aborda a variável climática pode dar importantes indícios de como a agenda vem sendo incorporada ao planejamento de longo prazo e às diretrizes de crescimento urbano (Sousa; Silva, 2023). Nesse sentido, diversos estudos buscaram analisar como a adaptação está incorporada à lei do PD dos municípios a partir de diferentes perspectivas. Melo *et al*. (2022), ao analisarem a última revisão do PD do Recife, apontam para a inserção da temática de forma robusta e alinhada às diretrizes internacionais, mas com aplicação limitada face ausência da previsão de instrumentos que permitam medidas práticas para adaptação. Apollaro e Alvim (2017) destacam que os principais fatores que limitam as ações de adaptação nos municípios são a ausência de monitoramento das condições climáticas e a dificuldade de superação das desigualdades socioambientais. Makhamra, Costa e Correa (2025), por sua vez, ao analisarem como os PDs de capitais brasileiras, corroboram os estudos anteriores indicando a existência de uma fragilidade normativa no enfrentamento das vulnerabilidades socioambientais e sugerindo que dispositivos para a redução de riscos sejam incorporados diretamente na lei do PD na tentativa de garantir sua efetivação. Nesse contexto, o presente estudo tem por objetivo investigar como os municípios no Brasil têm incorporado estratégias de adaptação e resiliência ao planejamento urbano a partir da análise dos Planos Diretores (PDs) Municipais das cidades brasileiras que fazem parte do C40. A pesquisa visa contribuir para o debate sobre diferentes abordagens de enfrentamento à crise climática no nível local de modo que sejam planejadas cidades mais inovadoras, resilientes e sustentáveis.

Materiais e Métodos

Para a compreensão da abordagem dos Planos Diretores sobre a adaptação e a resiliência, foi realizada uma análise de conteúdo (AC) categorial quantitativa, conforme aplicações previstas por Bardin (2016), referência no método. A estruturação da análise, entretanto, se baseou no detalhamento proposto em Sampaio e Lycarião (2021) que, ao reunirem a contribuição de diversos autores, agrupam uma série de atividades em três grandes etapas: 1) conceituação e propósito; 2) desenho; 3) análise.

A etapa inicial consiste na identificação do problema e definição de hipóteses. Ela tem origem na revisão da literatura e no levantamento do estado da arte do objeto de estudo. No contexto da emergência climática e da necessidade de ampliação de medidas para adaptação e desenvolvimento de resiliência a nível local, o propósito da AC é ajudar a responder o questionamento do presente estudo sobre como essas temáticas têm sido tratadas nos PDs e, portanto, a AC propõe uma análise da contagem da frequência de termos relacionados a estes dois conceitos.

A definição das unidades e subunidades de análise já configura o início da etapa de desenho da AC. Nesta fase foi proposta a delimitação da análise aos PDs dos municípios brasileiros que integram a rede de cidades C40, e que, portanto, se mostram alinhados com os acordos internacionais sobre o clima e já avançaram nas discussões sobre a emergência climática. Assim, a AC foi aplicada aos PDs vigentes dos municípios de Curitiba (2015), Fortaleza (2025), Rio de Janeiro (2024), Salvador (2016) e São Paulo (2023).

Um ponto central do desenho da AC é a estruturação de um referencial de codificação que irá estabelecer as categorias de análise e seus respectivos códigos, menor unidade da AC, a serem buscados nos documentos analisados. Tais estruturas foram definidas com base nos conceitos apresentados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), principal referência na produção de conhecimento científico e formulação de política pública na temática de mudanças climáticas (Molina, Abadal, 2021).

Desta forma, alinhando a conceituação teórica ao propósito da AC, foram determinadas 2 categorias: Processos de Adaptação, compreendendo a Adaptação às Mudanças Climáticas, e Construção de Resiliência, englobando Resiliência e Ampliação da Capacidade Adaptativa.

Para a análise de frequências, foram contabilizadas as ocorrências dos termos relacionados a categoria “adaptação” e todas as variantes derivadas do radical da palavra, “adapt”, como “adaptado” e “adaptação”, excluindo-se os termos relacionados a capacidade adaptativa, que foi incluída na categoria relacionada à construção da resiliência. Além deste termo, para a segunda categoria foram buscadas a palavra “resiliência” e seus derivados. Neste levantamento foram contabilizadas apenas as ocorrências em que o termo estava sendo utilizado no contexto das mudanças climáticas, o que foi possível a partir da análise semântica das palavras em cada caso, dispensando o uso de softwares. A análise individualizada das ocorrências foi fundamental no controle e garantia de resultados pertinentes.

A última etapa da AC é a análise, que pode compreender tratamento estatístico, interpretação e apresentação dos resultados. Neste estudo, foram avaliados como indicadores o número absoluto em que os termos associados a cada tema são mencionados nos documentos, assim como a proporção de ocorrência entre as categorias.

Resultados e Discussão

O resultado quantitativo da Análise de Conteúdo pode ser observado no gráfico da Figura 1, que apresenta o número de ocorrências de termos entre as categorias de Adaptação e Resiliência nos PDs das cidades da amostra.

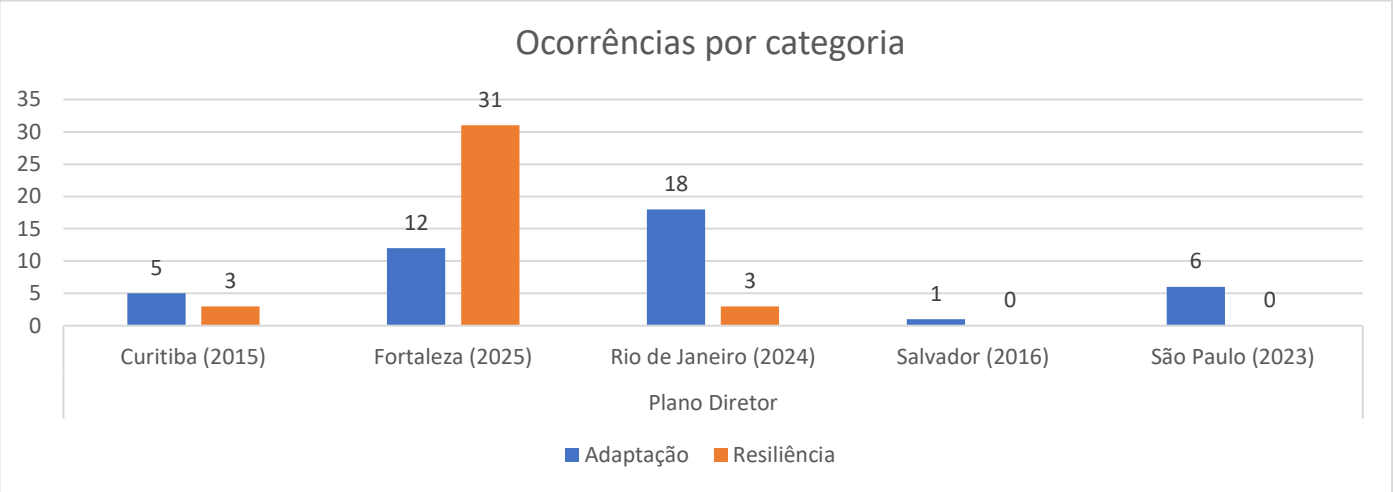


Figura 01: Gráfico das ocorrências dos termos das categorias Adaptação e Resiliência nos Planos Diretores analisados. Fonte: Elaboração própria (2026)

Nota-se que a frequência dos termos é bem heterogênea entre os documentos analisados. O município de Salvador é o que apresenta menos ocorrências dos termos, com apenas uma menção à adaptação, sendo esta relativa à zona costeira. Conforme apontado por Espíndola e Ribeiro (2020), o PD de Salvador não dialoga com medidas para adaptação às mudanças climáticas, necessitando de maior comprometimento com esta agenda, sobretudo quanto à contribuição da política territorial urbana na redução das vulnerabilidades socioclimáticas. Outros riscos como os de inundação, deslizamentos, ondas de calor, proliferação de doenças, secas meteorológicas e elevação do nível do mar, são abordados apenas em seu plano de ação climática lançado em 2020 (Sousa; Silva, 2023). O termo resiliência não é citado, assim como ocorre em São Paulo, município que registrou 6 referências à adaptação em seu PD. Destas 6 menções, metade foi acrescida na revisão intermediária realizada pela capital paulista em 2023, que incorporou o termo citando o alinhamento dos instrumentos de política pública ao Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima e ao Plano de Ação Climática do município, assim como prevendo uma abordagem voltada para o uso de infraestruturas verdes e Soluções baseadas na Natureza (SbN), em consonância a diretrizes internacionais e estaduais, como a Agenda 2030, o Acordo de Paris e o Programa Município Verde Azul.

O PD de Curitiba, por sua vez, prevê a elaboração do Plano de Mitigação e Adaptação às Mudanças do Clima como plano estratégico que priorizaria o conceito de adaptação ecossistêmica, tendo sido o PlanClima lançado 5 anos mais tarde, em 2020 (Curitiba, 2020). O documento propõe ainda a criação de um fundo metropolitano como forma de viabilizar a adaptação às mudanças climáticas e construir resiliência. O caráter metropolitano da resiliência aparece em mais outra ocorrência do termo, que também é mencionado quando definidas as ações e objetivos da Defesa Civil.

Com igual frequência, a palavra resiliência é encontrada em 3 ocorrências no PD do Rio de Janeiro, 2 delas junto ao termo relacionado à adaptação e, em outra, prevendo a criação do Centro de Operações e Resiliência, uma evolução do Centro de Operações Rio, inaugurado em 2010 (Rio de Janeiro, [s.d.]). Já a adaptação é mencionada no PD da capital fluminense 18 vezes, o maior número dentre os municípios analisados. Com uma seção dedicada à adaptação das favelas às mudanças climáticas, o termo “adaptação” está diretamente relacionado a populações e ecossistemas mais vulneráveis, prevendo a articulação das ações de adaptação com as diretrizes de redução de vulnerabilidade presentes no mesmo documento. Isso difere da abordagem encontrada no PD de outras capitais, que não relacionam as vulnerabilidades sociais como um importante aspecto no agravamento da vulnerabilidade às mudanças climáticas ou que tratam as vulnerabilidades socioambientais exclusivamente no âmbito da Proteção e Defesa Civil, como em Curitiba.

O Rio de Janeiro também apresenta como uma diretriz a adoção de SbN, destacando a importância dos serviços ecossistêmicos para a adaptação. Além disso, a temática da adaptação é diretamente vinculada à gestão de riscos, agricultura urbana e segurança alimentar e mesmo ao PD de Arborização Urbana. Outro diferencial é a territorialização de algumas ações, especificando as Áreas de Planejamento (AP), unidades nas quais o município se estrutura, que deveriam receber determinados tipos de projetos de adaptação aos efeitos das mudanças climáticas, tais como a elevação do nível do mar, ondas de calor, ilhas de calor, movimentos de massa, inundações e alagamentos. O PD especifica, ainda, a requalificação da área do rio Acari, com a implementação de estratégias adaptativas. Embora o PD do Rio de Janeiro apresente avanços ao indicar a necessidade de investimentos e ações em áreas de maior vulnerabilidade socioambiental e ao territorializar determinadas ações, Makhamra, Costa e Correa (2025) apontam que o documento ainda carece de dispositivos que garantam sua efetividade, ficando este passo a cargo de regulamentações futuras. Ao compararem o PD da capital fluminense ao de outras capitais brasileiras, os autores observaram que essa mesma fragilidade se repete em outras cidades, ao exemplo de Curitiba.

Fortaleza foi o município em que os termos buscados apresentaram maior frequência, totalizando 43 ocorrências, número superior à soma das ocorrências observadas no PD de todos os demais municípios analisados. A nova abordagem trazida no PD de 2025 veio preencher uma lacuna existente no PD anterior, de 2009, como observado no estudo de Sousa e Silva (2023) que apontava para ausência de articulação entre o enfrentamento às mudanças climáticas e a política urbana. Além do número absoluto expressivo em cada categoria, o PD da capital cearense se destaca pela proporção entre estas, tendo os termos relacionados à resiliência correspondido a mais de 70% do total, configurando-se como a única capital, entre as Cidades C40, em que as ocorrências relativas à resiliência se sobrepuseram às de adaptação. Neste PD, a resiliência foi assinalada como um fundamento estratégico, junto à sustentabilidade e à equidade.

O PD de Fortaleza também apresenta uma série de políticas setoriais em que as temáticas observadas são tratadas de forma transversal, mas se concentram sobretudo na Política de Meio Ambiente e Resiliência Urbana, reunindo mais de 40% das ocorrências do documento. Um dos eixos em que essa política se estrutura é o Eixo de Urbanismo Climático. Observa-se que, por diversas vezes, os termos se encontram associados aos conceitos de vulnerabilidades socioambientais e justiça climática, indicando, ainda, a necessidade de alocação de recursos para a população mais vulnerável. Neste sentido, o PD também prevê restrições de crescimento urbano em áreas de risco, utilização de SbN nas edificações e recuperação de áreas degradadas.

Nota-se que data de publicação dos PDs tende a influenciar a abordagem destes quanto aos conceitos de adaptação e resiliência, uma vez que os termos buscados aparecem com maior frequência nos PDs mais recentes, a exemplo de Rio de Janeiro e Fortaleza. Curitiba e Salvador, por sua vez, já se encontram no período de revisão da lei que rege seus PDs vigentes, processo obrigatório a cada 10 anos, conforme estabelecido pelo Estatuto da Cidade (Brasil, 2001). Nestas cidades, os Planos de Ação Climática se apresentam como principal documento que institui no planejamento as diretrizes e metas sobre o clima, tendo estes sido elaborados posteriormente à publicação da lei dos atuais PDs. Já São Paulo, apesar da recente revisão de seu PD, também direciona estas temáticas a Planos e Políticas setoriais, o que, segundo Sousa e Silva (2023), reflete a preferência da União na adoção destes instrumentos, sob o risco de não definir deveres jurídicos da Agenda climática de forma clara e efetiva.

Considerações Finais

O presente estudo mostra que a temática da adaptação às mudanças do clima tem sido incorporada de forma crescente no planejamento urbano das cidades brasileiras por meio de seus Planos Diretores, porém em ritmo mais lento que os avanços dos efeitos da crise climática em frequência e magnitude. Fortaleza e Rio de Janeiro, com os PDs vigentes datando, respectivamente, de 2025 e 2024, foram as cidades com mais menções a termos relacionados à adaptação e à resiliência dentre as analisadas, com evoluções registradas em relação aos documentos anteriores.

A referência a conceitos relativos à adaptação dá indícios de que esse aspecto do enfrentamento à emergência climática está sendo considerado no planejamento, assim como demonstra a capacidade do corpo técnico dos municípios para lidar com esse tema de forma transversal. No entanto, quando analisada de forma isolada, a frequência de ocorrências de palavras destas categorias não garante a efetividade de ações de adaptação nem a conscientização da população quanto ao problema.

Como visto, algumas cidades citam em seus PDs a existência ou previsão de elaboração de Planos Setoriais de mudanças climáticas, que aliados constituem um arcabouço robusto para subsidiar uma Política Climática municipal.

Considerando que o recorte de análise são cidades brasileiras que fazem parte da rede de cidades C40 e que, portanto, recebem suporte técnico para o desenvolvimento de capacidades para o fortalecimento da ação climática, fica evidente o desafio enfrentado pelos mais de cinco mil municípios do Brasil. Tal cenário sugere a necessidade de avanços de estruturas de governança para adaptação que apoiem as cidades brasileiras, de todas as escalas, principalmente no sentido da redução das vulnerabilidades socioambientais.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelas bolsas do CNPq e da Fundação Araucária. À Fundação Araucária pelo fomento à Rede NAPI Emergências Climáticas e ao Apoio financeiro do CNPq.

Referências Bibliográficas

APOLLARO, C.; ALVIM, A. Estratégias e desafios do planejamento urbano para a adaptação de cidades frente à mudança climática. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 13, n. 6, 15 dez. 2017.

DRUMONT, R.; ALMEIDA, R.; NASCIMENTO, N. Mudanças climáticas e Plano Diretor: mitigação de inundações em Belo Horizonte. **Cadernos Metrópole**, v. 25, n. 58, p. 899–922, 1 dez. 2023.

BARDIN, Laurence. **Análise de Conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.

BRASIL. **Lei n. 10.257, de 10 de julho de 2001**. Brasília: Planalto, 2001. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm>. Acesso em: 24 abr. 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Plano Clima Adaptação – Sumário Executivo**. Brasília, DF: MMA; MCTI; CC/PR, 2025. Disponível em: <www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/mudanca-do-clima/plano-clima-adaptacao-sumario-executivo.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2026.

C40. **Our Cities**. Disponível em: <https://www.c40.org/cities/>. Acesso em 30 mar. 2026.

CID, A.; LERNER, A. M. Local governments as key agents in climate change adaptation: challenges and opportunities for institutional capacity-building in Mexico. **Climate Policy**, p. 1–13, 11 jan. 2023.

CURITIBA. **Lei 14.771, de 17 de dezembro de 2015.** Dispõe sobre a revisão do Plano Diretor de Curitiba de acordo com o disposto no art. 40, § 3º, do Estatuto da Cidade, para orientação e controle do desenvolvimento integrado do Município. Curitiba, PR: Poder Executivo, 2015.

CURITIBA. Prefeitura Municipal. **Plano Municipal de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas – PlanClima**. Curitiba, 2020.

ESPÍNDOLA, I. B.; RIBEIRO, W. C. Cidades e mudanças climáticas: desafios para os planos diretores municipais brasileiros. **Cadernos Metrópole**, v. 22, n. 48, p. 365–396, maio 2020.

FORTALEZA. Prefeitura de Fortaleza passa a integrar a rede global de cidades C40 de enfrentamento à crise climática. **Prefeitura de Fortaleza**, Fortaleza, 19 maio 2024. Disponível em: <https://www.fortaleza.ce.gov.br/noticias/prefeitura-de-fortaleza-passa-a-integrar-a-rede-global-de-cidades-c40-de-enfrentamento-a-crise-climatica>. Acesso em 01 maio 2026.

FORTALEZA. **Projeto de Lei Complementar nº 49/2025, de 26 de novembro de 2025.** Institui o Plano Diretor Participativo e Sustentável do Município de Fortaleza. Fortaleza, CE: Poder Executivo, 2025.

GRANBERG, M.; GLOVER, L. The Climate Just City. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1201, 24 jan. 2021.

HICKEL, J. Quantifying national responsibility for climate breakdown: an equality-based attribution approach for carbon dioxide emissions in excess of the planetary boundary. **The Lancet Planetary Health**, v. 4, n. 9, p. 399–404, 1 set. 2020.

ICLEI – GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE. Quatro capitais brasileiras concluem seus Planos de Ação Climática. **ICLEI**, 18 dez. 2020. Disponível em <https://americadosul.iclei.org/quatro-capitais-brasileiras-concluem-seus-planos-de-acao-climatica/>. Acesso em: 02 maio 2026.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Annex I: Glossary. In: **CLIMATE Change 2023: Synthesis Report**. Gevena: IPCC, 2023. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.002.

JACOBI *et al.* **Governança ambiental na macrometrópole paulista face à variabilidade climática.** São Carlos: Rima, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.55333/rima-978-65-84811-08-9. Acesso em: 28 abr. 2026.

JIA, G. *et al*. Land–climate interactions. In: IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.** IPCC, 2019. cap. 2, p. 131-248.

KEHLER, S.; BIRCHALL, S. J. Social vulnerability and climate change adaptation: The critical importance of moving beyond technocratic policy approaches. **Environmental Science & Policy**, v. 124, p. 471–477, out. 2021. DOI: doi.org/10.1016/j.envsci.2021.07.025.

KYRIAKOPOULOS, G. L.; SEBOS, I. Enhancing Climate Neutrality and Resilience through Coordinated Climate Action: Review of the Synergies between Mitigation and Adaptation Actions. **Climate**, v. 11, n. 5, p. 105, 10 maio 2023.

LEE, T.; VAN DE MEENE, S. Who teaches and who learns? Policy learning through the C40 cities climate network. **Policy Sciences**, v. 45, n. 3, p. 199–220, 7 jul. 2012.

LIN, B. B. *et al*. Integrating solutions to adapt cities for climate change. **The Lancet Planetary Health**, v. 5, n. 7, p. e479–e486, 1 jul. 2021.

MAKHAMRA, Y. M. R.; COSTA, B. L. de C.; CORREA, J. C.. O enfrentamento das vulnerabilidades socioambientais no Rio de Janeiro: Desafios e perspectivas para o Plano Diretor. In: Encontro Latino-americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis (euroELECS), 6., 2025. **Anais [...]**. [S. l.], 2025. p. 1–11. DOI: 10.46421/euroelecs.v6.7983.

MELO *et al.* Adaptação aos impactos das mudanças climáticas na perspectiva do plano diretor da cidade do Recife. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 23, 2022. DOI: https://doi.org/10.22296/2317-1529.rbeur.202140pt.

MIKULEWICZ, M. *et al*. Intersectionality & Climate Justice: A call for synergy in climate change scholarship. **Environmental Politics**, v. 32, n. 7, p. 1–12, 15 fev. 2023.

MOLINA, T.; ABADAL, E. The Evolution of Communicating the Uncertainty of Climate Change to Policymakers: A Study of IPCC Synthesis Reports. **Sustainability**, v. 13, n. 5, p. 2466, 25 fev. 2021.

RIO DE JANEIRO. **História - Centro de Operações e Resiliência**. Disponível em: <https://cor.rio/historia/>. Acesso em: 18 abr. 2026.

RIO DE JANEIRO (Município). **Lei Complementar nº 270, de 17 de janeiro de 2024.** Dispõe sobre a Política Urbana e Ambiental do Município, institui a revisão do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Sustentável do Município do Rio de Janeiro e dá outras providências. Rio de Janeiro, RJ: Poder Executivo, 2024.

SALVADOR. **Lei nº 9.069, de 30 de junho de 2016.** Dispõe sobre o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano do Município de Salvador – PDDU 2016 e dá outras providências. Salvador, BA: Poder Executivo, 2016.

SAMPAIO, R.; LYCARIÃO, D. **Análise de conteúdo categorial: manual de aplicação**. Brasília: Enap, 2021.

SÃO PAULO (Município). **Lei nº 17.975, de 8 de julho de 2023**. Dispõe sobre a revisão intermediária do Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo, instituído pela Lei nº 16.050, de 31 de julho de 2014, e dá outras providências. São Paulo, SP: Diário Oficial da Cidade de São Paulo, 2023.

SOUSA, M. B. B.; SILVA, J. I. A. O. Crise climática e a importância dos planos diretores e setoriais de mudanças climáticas. **Boletim de conjuntura (BOCA)**, v. 16, n. 46, p. 118–140, 2023. DOI: 10.5281/zenodo.8408738.
ZHANG, H. *et al*. Unequal urban heat burdens impede climate justice and equity goals. **The Innovation**, v. 4, n. 5, p. 100488–100488, 1 set. 2023.

MONITORAMENTO DE PRECIPITAÇÃO EM UBERLÂNDIA - MG NO PERÍODO DE 2005 A 2025

1 Gabriel Honorato Silva, 2 Glaicon Florisbelo Alves, 3 Márcia Regina Batistela Moraes, 4 Roberto Terumi Atarassi, 5 Samara Carbone

1 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: gabriel.hosi@ufu.br; 2 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: glaicon@ufu.br; 3 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: marcia.batistela@ufu.br; 4 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: robertota@ufu.br; 5 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: samara.carbone@ufu.br

Palavras-chave: pluviosidade; abordagem gráfica; oscilação sul.

Resumo

O presente estudo visa investigar o comportamento da precipitação pluvial no município de Uberlândia, utilizando a premissa de que a chuva é um dos principais componentes na manutenção socioambiental, atuando no regime hídrico com o abastecimento de água, influenciando drenagem e irrigação. Por outro lado, o extremo da chuva, seja o seu excesso ou a falta, pode desencadear problemas de crise hídrica, perda de infraestrutura e ameaça à integridade da população. Este trabalho usufrui de linguagem de programação Python para lidar com os dados de precipitação fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e apresentar as análises obtidas através de abordagens gráficas. Juntamente à análise convencional de monitoramento do volume pluviométrico da cidade, investigou-se também a atuação do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (sigla em inglês ENSO) no sistema de chuvas da região. Todas as abordagens têm como objetivo colaborar com a distribuição informativa da dinâmica ambiental em Uberlândia e nas discussões de elaboração das políticas públicas, com o enfoque em soluções para as problemáticas relacionadas à precipitação pluvial.

Introdução

O estudo do regime pluviométrico de uma dada região traz consigo uma significante importância, visto que a quantidade de chuva ocorrida influencia diretamente parâmetros ambientais, como o balanço hídrico, e consequentemente, o abastecimento e a drenagem de água. Indo além, o mérito da análise do comportamento pluvial se intensifica, pois vêm crescendo a distribuição dos chamados eventos extremos, isto é, ocorrências meteorológicas que ultrapassam o padrão esperado para uma região. Esses fenômenos anormais podem ser chuvas intensas, capazes de desencadear enchentes e deslizamentos e colocar em risco a integridade de muitas pessoas, ou até mesmo o inverso, com eventos de forte estiagem, afetando plantios e produções no geral (IPCC, 2022).

No presente trabalho a análise é feita em relação a Uberlândia, cidade situada no Triângulo Mineiro, que é parte de uma mesorregião caracterizada com o clima Aw, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger. A classe Aw está associada ao clima tropical de savana, com o inverno sendo destacadamente a estação seca (Reboita *et al*., 2015). O padrão climatológico de Uberlândia é influenciado por diversos sistemas atmosféricos, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), uma faixa de nebulosidade abrangendo a área da Amazônia ao Oceano Atlântico, que ocorre geralmente no verão, e traz a umidade de origem amazônica até o sudeste do Brasil, acarretando chuvas volumosas para esta região. Outros componentes atmosféricos que atuam na estação chuvosa no Triângulo Mineiro são as massas de ar, principalmente a Massa Equatorial Continental (mEc), porção de ar com grande dimensão e uniformidade de temperatura e umidade, que se origina na região amazônica e se estende ao longo do país, espalhando umidade e contribuindo com a pluviosidade (Sousa *et al*., 2009; Verdan, 2025).

Além dos fatores regionais, há um ciclo maior, que altera globalmente o padrão climático. Trata-se do El Niño-Southern Oscillation (ENSO), sistema que se manifesta em fases opostas, a partir da alteração na temperatura das águas do Oceano Pacífico, com o El Niño sendo o aquecimento das águas e a La Niña, o resfriamento. O ENSO é monitorado através das flutuações nas anomalias de dois parâmetros: temperatura da superfície do mar em determinadas regiões do Pacífico (por exemplo, Niño 3.4) e diferença de pressão atmosférica entre locais, como os historicamente relatados entre Taiti, na Polinésia Francesa e Darwin, na Austrália. Essa medida de diferença de pressão é nomeada Índice de Oscilação Sul (sigla em inglês SOI) e é utilizado para verificar a ocorrência e a intensidade de eventos de El Niño e La Niña (NOAA, 2026).

Tendo em vista os sistemas atmosféricos atuantes, surge a necessidade de avaliar, com dados reais, como vem se portando a dinâmica pluvial em Uberlândia. As ferramentas utilizadas para a realização do estudo são as séries históricas, pois carregam consigo os registros de quantidade de chuva em uma localidade para um determinado período, possibilitando a geração de múltiplas abordagens de estudo.

Material e Métodos

As informações referentes a quantidade de chuva em Uberlândia foram coletadas a partir da estação meteorológica A507 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A estação está instalada no Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia e fornece dados de múltiplos parâmetros atmosféricos para a rede nacional. Os dados pluviométricos foram importados a partir do sítio eletrônico do INMET, com as medições horárias de pluviosidade no período de 2005 a 2025. Para as tratativas relacionadas ao fenômeno ENSO obteve-se o histórico de dados do SOI, para a mesma faixa temporal, através da plataforma do National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA).

Em vista da quantidade massiva de dados a serem trabalhados, o uso de linguagem de programação Python foi aplicado para o tratamento e análise das informações. O processamento foi realizado através da biblioteca Pandas, útil no gerenciamento de dados expressivos, além da biblioteca Matplotlib e sua derivada Seaborn, responsáveis pela produção das visualizações gráficas do estudo.

Para o processamento dos dados e a busca por maior fidedignidade dos dados, realizou-se um pré-tratamento das planilhas brutas, removendo dados incongruentes e aplicando um filtro de conformidade, optando-se por trabalhar com dados que apresentassem no mínimo 80% de medidas válidas. O critério para a validade do dado consiste em: dezenove ou mais medições condizentes de precipitação para um dia, isto é, que não fossem valores negativos ou NaN (valor inválido). Os dias que não alcançaram esta condição foram retirados do estudo. Para as análises de acumulados anuais, cada ano deveria conter pelo menos 80% de dias considerados adequados. A concentração de dados falhos se deu no início da série, com os anos de 2005 e 2008 apresentando percentual de dias válidos inferior aos 80% necessários, com isso, foram excluídos da abordagem anual. No contexto geral da série, 92% dos dados se mostraram coerentes.

Em relação às ações utilizadas, a primeira abordagem foi a disposição mensal da precipitação no escopo da série histórica, utilizando gráfico do tipo violino para visualizar a distribuição e a frequência da chuva no município. O violino é uma ferramenta gráfica que deriva do *boxplot*, somando ao seu uso tradicional a capacidade de determinar densidade de frequência (Hintze e Nelson, 1998).

A segunda operação do estudo foi a classificação e quantificação dos eventos extremos de precipitação pluvial na cidade de Uberlândia. Utilizando a metodologia proposta por Monteiro e Zanella (2023), foi gerada uma nova série com acumulados diários de precipitação, realizando a filtragem em valores não-nulos, ordenando o conjunto de dados de maneira crescente e dividindo o número do registro observado pelo número total de registros (N) + 1, em prol de encontrar o valor mais próximo de 0,95, definindo assim o Quantil 0,95 do conjunto, ou seja, o valor de corte para a análise dos dias mais chuvosos da série. Filtrando os dados diários a partir do limiar encontrado e usufruindo de operações estatísticas, foi possível classificar os eventos de precipitação como moderado, forte ou muito forte. As Equações (01, 02 e 03) apontam a equação utilizada para determinar a classe da precipitação diária.

$$Muito\ Forte = Md + 2\sigma \leq P \quad (01)$$

$$Forte = Md + 1\sigma \leq P < Md + 2\sigma \quad (02)$$

$$Moderada = Md \leq P < Md + 1\sigma \quad (03)$$

Onde *Md* é mediana, *P* a precipitação e σ o desvio-padrão.

Abordou-se a distribuição da chuva com o ano como intervalo de tempo para análise, utilizando-se dos dados de precipitação de cada ano da série para produzir duas representações diferentes: o acumulado de precipitação anual e quantidade de dias sem chuva em cada ano. Para a definição de um dia sem chuva, tomou-se como métrica a precipitação pluvial diária inferior a 1 milímetro.

Outra abordagem foi a associação do regime pluviométrico do município com o SOI, buscando definir a influência do fenômeno ENOS no comportamento da chuva na região. O índice de pressão a nível do mar foi obtido do sítio eletrônico do NOAA, no qual há a disponibilização da planilha com os valores mensais padronizados do índice. Para corresponder à padronização do SOI, utilizou-se o princípio da indexação, que consiste em converter os dados de precipitação em índices capazes de diagnosticar a intensidade e a frequência de chuvas e secas. O método aplicado foi o Standardized Precipitation Index (SPI), proposto por McKee *et al*. (1993), como uma forma de padronização da precipitação e aplicado no presente estudo para transformar os acumulados mensais da série em índices. Um índice SPI acima de 1,5 indica uma chuva severa, por outro lado, o índice abaixo de -1,5 está relacionado à seca muito forte (Santos *et al*., 2017). A Equação 04 foi utilizada para a obtenção do índice SPI.

$$SPI = \left(\frac{P_{observada} - P_{média\ mensal}}{\sigma_{mensal}}\right) \quad (04)$$

Onde *SPI* é o índice de chuva, $P_{observada}$ é a precipitação observada em um mês, $P_{média\ mensal}$ é a precipitação média para o mês e σ_{mensal} é o desvio padrão para o mês.

Resultados e Discussão

A partir do processamento dos dados, a visualização gráfica do comportamento pluviométrico mensal da série histórica dos 21 anos pode ser encontrada na Figura 01. O formato assimétrico dos violinos aponta distribuição não normal dos dados. A altura dos violinos refere-se à variabilidade na distribuição de chuva em cada mês, portanto, os meses mais alongados, como janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, apontam maior flutuação na quantidade de precipitação mensal e isso coincide com estes meses sendo apontados como a estação chuvosa no município. Já os meses com formato achatado, isto é, menor intervalo entre o quartil 1 e quartil 3, como junho, julho e agosto, demonstram baixa variação na distribuição de precipitação pluvial. Essa

falta de variabilidade está relacionada com o fato de que esses meses compõem a estação seca em Uberlândia, caracterizados com valores menores de precipitação.

A sazonalidade encontrada a partir da Figura 01 coincide com o estudo de Reboita *et al*. (2015), que atribui à classe climática Aw maiores volumes de precipitação no verão e tendências de seca no período de inverno. Também concorda com o estudo de Santos (2015), que encontrou o comportamento sazonal na média mensal de precipitação para a mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. Destaca-se também os meses de abril e novembro, pois diferenciam-se do padrão unimodal apresentado pelo restante dos meses. Esses dois meses apresentam o formato bimodal, isto é, há concentração de dados em duas faixas diferentes de precipitação pluvial, como em abril, com maior densidade de dados apontando para 50 milímetros e 130 milímetros e novembro, com os valores centrados em 120 milímetros e 260 milímetros de chuva.

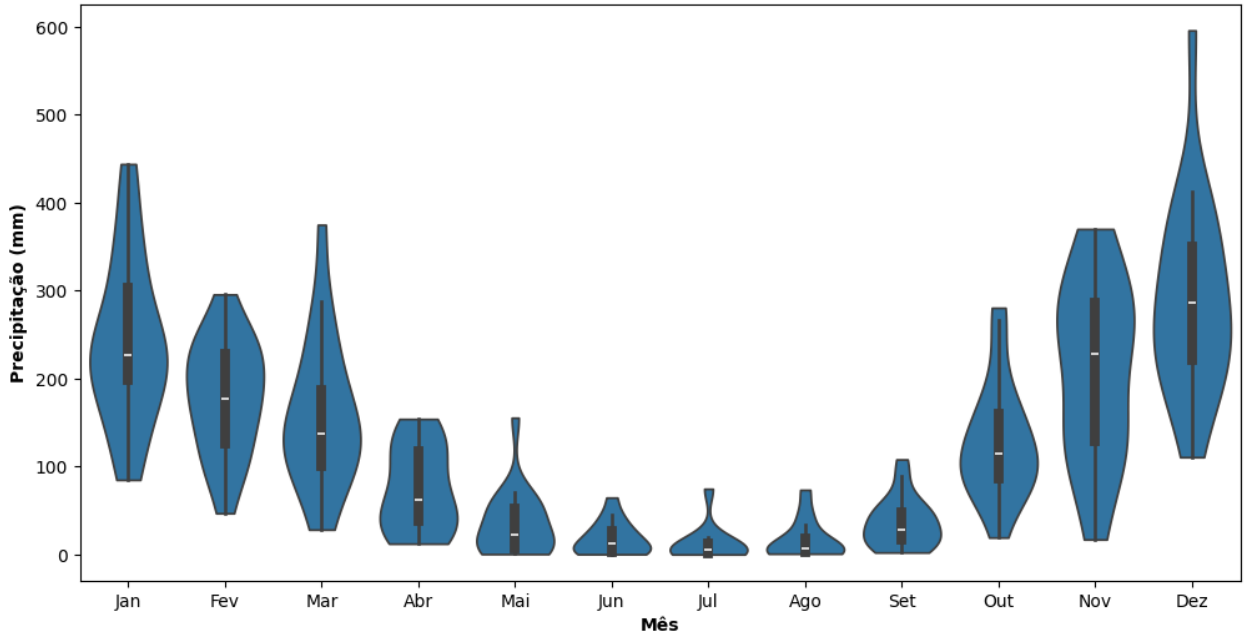


Figura 01: Distribuição mensal de precipitação pluvial, no período de 2005 a 2025 em Uberlândia-MG.
Fonte: Autores (2026)

Aplicando a metodologia proposta por Monteiro e Zanella (2023) na série de acumulados diários, foi possível realizar a classificação dos eventos extremos de precipitação pluvial, utilizando-se o Quantil 0,95 para encontrar o valor de corte para os 5% de dias com maior quantidade de chuva, isto é, o limiar da série. Foi encontrado 41 milímetros como o limite inferior da série, sendo assim, filtrou-se o conjunto em valores acima deste limiar.

A partir da nova série, somente com valores acima de 41 milímetros de chuva, utilizou-se operações estatísticas presentes nas Equações (01, 02 e 03) para encontrar as faixas de precipitação para cada classe e enfim, contabilizar a ocorrência das classificações de chuva. Uberlândia, entre os anos de 2005 e 2025, contabilizou 9 ocorrências de eventos classificados como muito fortes. Buscou-se comparação com os resultados obtidos por Monteiro e Zanella (2023) para Goiânia - GO, município com classificação climática similar a Uberlândia de acordo com a classificação de Köppen-Geiger. Entre 2002 e 2021, Goiânia obteve 10 eventos de intensidade muito forte, com o valor mínmo para essa classe sendo 88,5 milímetros de precipitação pluvial diária. Nota-se certa semelhança entre os resultados obtidos para as duas cidades citadas, ainda que a faixa de tempo abordada seja diferente. Essa similaridade pode ser impulsionada pela proximidade entre os municípios no fator classificação climatológica.

Entre os 64 eventos encontrados, destaca-se 18 eventos de classes forte e muito forte, os quais foram investigados, em prol de determinar as alterações no volume pluviométrico dos meses em que estes eventos de chuva severa estão inseridos. Ao analisar os 18 eventos e seus respectivos meses, notou-se que apenas 8 meses foram classificados como chuva severa, ou seja, SPI acima de 1,5 (Santos *et al*., 2017). Como não houve totalidade na relação evento extremo e chuva severa no mês, pode-se deduzir que estas ocorrências de dias de alta precipitação atuam como picos de chuva nos seus meses, não acarretando volume pluviométrico alto no restante do mês. A Tabela 01 contém o intervalo de classe e o número de eventos inseridos em cada classe.

Classificação de Intensidade	Precipitação acumulada diária (mm)	Número de Ocorrências
Muito Forte	$83{,}15 \leq P$	9
Forte	$66{,}67 \leq P < 83{,}15$	19
Moderada	$50{,}2 \leq P < 66{,}67$	36

Tabela 01: Classificação de eventos de precipitação, no período de 2005 a 2025 em Uberlândia-MG.
Fonte: Autores (2026)

Analisou-se como a distribuição de precipitação vem ocorrendo na escala anual, tanto na forma de acumulado de chuva, quanto no número de dias sem chuva em cada ano. Para a determinação de um dia sem chuva, tomou-se como critério a precipitação diária inferior a 1 milímetro. Como os anos de 2005 e 2008 não alcançaram os 80% de dias válidos, foram retirados desta abordagem.

Conforme a Figura 02, a média anual de precipitação pluvial foi de 1432,2 milímetros. Dos 19anos passíveis de serem analisados, em 9 deles a precipitação foi acima da média anual. O ano mais chuvoso da série foi 2012, com 1701,6 milímetros de chuva. Realizando uma comparação entre a presente série e a média para a região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba abordada por Fonseca (2023), percebe-se que Uberlândia demonstrou menor variabilidade na precipitação anual em relação à média da mesorregião, para o escopo de 2005 a 2018, com os dados concentrando-se na faixa de 1200-1400 milímetros de chuva anual. Nota-se um crescimento na quantidade de dias sem chuva nos últimos três anos da série (2023, 2024 e 2025). Essa observação pode ser correspondida com a queda do acumulado de precipitação para o mesmo período, salvo 2024.

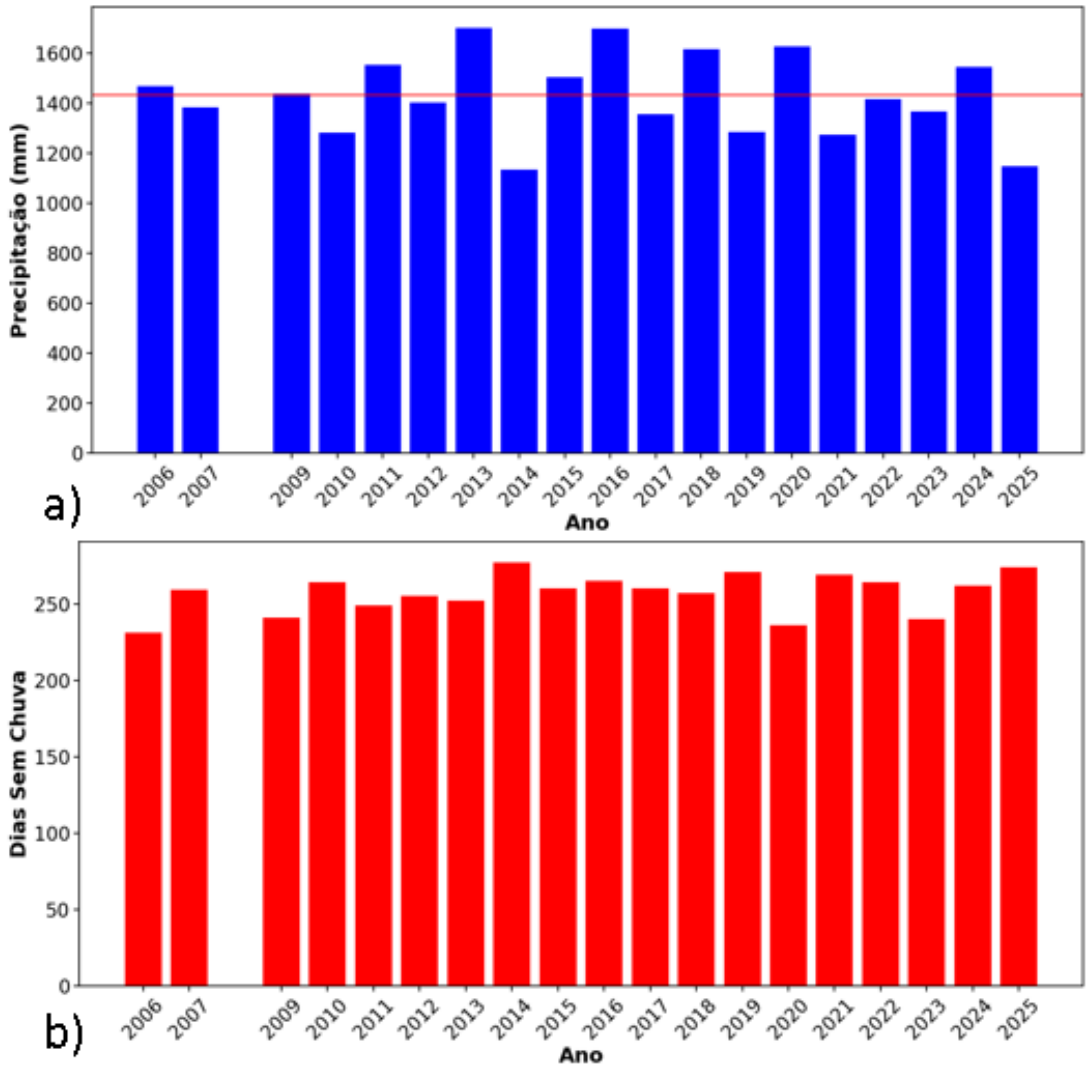


Figura 02: Acumulados anuais de (a) precipitação e (b) dias sem chuva, no período de 2005 a 2025 em Uberlândia-MG. Fonte: Autores (2026)

Para investigar a influência do ENSO no regime pluviométrico de Uberlândia, uma das propostas foi a sobreposição gráfica entre o índice de precipitação resultante da padronização pelo SPI e o Southern Oscillation Index (SOI). Os valores positivos de SPI apontam uma precipitação pluvial superior ao padrão da série, enquanto valores negativos indicam períodos mais secos em relação ao padrão do conjunto. Já o SOI se relaciona com o fenômeno ENSO da seguinte maneira: eventos seguidos de índice negativo apontam aquecimento das águas do Oceano Pacífico (El Niño) e valores positivos subsequentes refletem em resfriamento do Pacífico (La Niña). Além da busca pela relação entre o regime de chuvas e o ENSO, a abordagem do SPI permite visualizar a variabilidade da precipitação pluvial da série ao decorrer do tempo, destacando os picos do índice como excesso ou falta de pluviosidade. Com base no coeficiente de correlação obtido de -0,013, notou-se que não há relação direta e imediata entre o Índice de Oscilação Sul e a precipitação em Uberlândia. Este fato pode estar relacionado a diferentes motivos, por exemplo, a presença de outros sistemas atmosféricos, tais como penetração de sistemas frontais, linhas de instabilidade, entre outros, devem interferir na precipitação local e regional. Além disto, o Triângulo Mineiro (TM) está

localizado em uma região intermediária de ciclos anuais de precipitação da América do Sul, isto é, de acordo com a classificação do Atlas Climático de Sudamerica utilizado por Reboita *et al*., (2010) entre a R4 (sul do Brasil, sul do Paraguai e Uruguai) e R6 (norte da região do Brasil, litoral do nordeste do Brasil), podendo ser influenciada por estes dois ciclos anuais de precipitação. Outro aspecto importante é que a região do TM é afetada pelo sistema de monção da América do Sul (Vera *et al.*, 2006).

Outra abordagem gráfica para a interação entre SOI e SPI no município foi a dispersão dos pontos entre os índices, utilizando-se dos quadrantes para buscar correlação. Cada mês da série está representado como um ponto no gráfico (Figura 04). Assumindo uma chuva severa como o índice SPI acima de 1,5 e seca severa como SPI inferior a -1,5 (Santos *et al*., 2017). O eixo Y positivo (negativo) do plano entende-se como ocorrências de La Niña (El Niño). Por mais que a distribuição dos pontos seja relativamente equilibrada entre os quadrantes, há predominâncias passíveis de serem apresentadas. Em relação à seca severa, 57,1% dos pontos se enquadram em situações de SOI igual ou superior a 0,5, que se relaciona com fenômenos de La Niña de intensidade moderada ou forte. 14,3% dos pontos de seca com SOI igual ou inferior a -0,5, associados a possível El Niño moderado ou forte. 28,6% dos pontos de seca severa não se encaixaram em nenhuma das duas situações.

Já para a análise de chuva severa, 52,6% dos pontos são situados em meses caracterizados como La Niña moderada ou forte. 31,6% dos pontos se enquadram em ocorrências de El Niño moderado ou forte. Somente 15,8% dos pontos de chuva severa não correspondem às situações de ENSO abordadas. Portanto, para o presente estudo, observa-se maior ocorrência de eventos de chuva severa em meses característicos de La Niña. Para efeitos de comparação, Galvani *et al* (1998) encontrou relação entre o fenômeno de El Niño com o desvio positivo de chuva para Maringá-PR. No geral, a série utilizada neste estudo, apresentou mais eventos de chuva severa (19) do que seca severa (07). Os resultados obtidos neste estudo também mostram que há mais episódios de chuva severa do que de seca severa no município, no entanto, é importante considerar que em termos de representação espacial foi utilizado apenas um ponto, o da estação do INMET, o qual não pode ser tomado como indicador da realidade de todo o município.

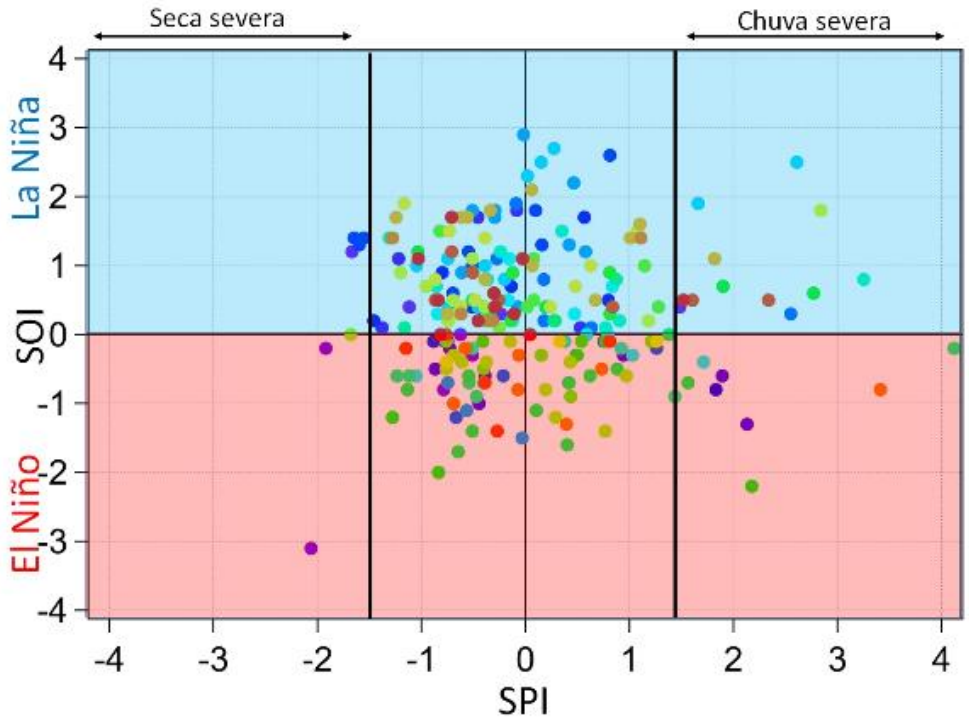


Figura 04: Relação entre SOI e SPI na dispersão de pontos, no período de 2005 a 2025 em Uberlândia-MG.
Fonte: Autores (2026)

Considerações Finais

Com base nos resultados obtidos, a série histórica com os dados do município de Uberlândia, no intervalo de 2005 a 2025, demonstrou sazonalidade no regime de chuvas, com suas estações seca e chuvosa bem definidas. Com relação a influência do fenômeno ENSO na dinâmica pluviométrica, não foi possível atestar relação direta entre suas fases e intensidades e o volume de chuva verificado. A análise do comportamento atmosférico, especialmente o regime de chuvas, requer mais abordagens e ensaios para que seja possível determinar relações entre diferentes fatores. Sendo assim, outros estudos podem utilizar novas abordagens e estratégias, dando continuidade aos resultados já obtidos.

Levando em consideração as alterações climáticas comprovadas globalmente, este trabalho vem colaborar com o debate relacionado à implementação de políticas públicas para a gestão de risco urbana e rural, subsidiando a concepção e o planejamento de programas focados em sustentabilidade, habitação e assistência social em Uberlândia.

Agradecimentos

Gratidão à equipe do Complexo de Tecnologias Ambientais do Cerrado (CTAC-UFU) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio.

Referências Bibliográficas

FONSECA, R. G. Estudo e análise da variabilidade e tendência da precipitação no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. [S.l.]: Universidade Estadual Paulista (Unesp), 27 nov. 2023.

GALVANI, E.; PEREIRA, A.; KLOSOWSKI, É. Relações entre o índice de oscilação sul e o total mensal de chuva em Maringá-Pr. **Acta Scientiarum**, v.20, n.4, p.531-535, 1998.

HINTZE, J. L.; NELSON, R. D. Violin plots: a box plot-density trace synergism. **The American Statistician**, v. 52, n. 2, p. 181–184, 1998. DOI: https://doi.org/10.1080/00031305.1998.10480559

IPCC. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2022.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: 8th Conference on Applied Climatology, 1993, Anaheim p. 179-184.

MONTEIRO, J. B.; ZANELLA, M. E. A metodologia estatística dos eventos extremos de precipitação: uma proposta autoral para análise de episódios pluviométricos diários. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 32, n. 19, p. 494–516, 2023. DOI: https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16323

NOAA – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Climate Prediction Center: ENSO (El Niño/Southern Oscillation). Disponível em: https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/. Acesso em: 8, abr. 2026.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. da; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/s0102-77862010000200004

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, 2015. https://doi.org/10.5380/abclima.v17i0.41493

SANTOS, J. G. Variabilidade pluviométrica na Mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba - MG. 2015. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015. DOI: https://doi.org/10.14393/ufu.di.2015.202

SANTOS, S. R.; SANSIGOLO, C. A.; NEVES, T. T. de A. T.; CAMPOS, T. L. de O. B.; DOS SANTOS, A. P. P. Frequência dos eventos extremos de seca e chuva na Amazônia utilizando diferentes bancos de dados de precipitação. **Revista Brasileira de Geografia Física**, *[S. l.]*, v. 10, n. 2, p. 468–478, 2017. DOI: 10.5935/1984-2295.20170029. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/234033.

SOUSA, R. R.; COSTA, R. A.; ASSUNÇÃO, H. F.; MELO, S. C. de. Variações pluviométricas no Triangulo Mineiro-MG. GEONORDESTE, ano XX, n. 2. 2009. p. 179-201. Disponível em: https://periodicos.ufs.br/geonordeste/article/view/2462/2144.

VERA, C.; HIGGINS, W.; AMADOR, J.; AMBRIZZI, T.; GARREAUD, R.; GOCHIS, D.; GUTZLER, D.; LETTENMAIER, D.; MARENGO, J.; MECHOSO, C. R.; NOGUES-PAEGLE, J.; DIAS, P. L. S.; ZHANG, C. Toward a unified view of the American monsoon systems. **Journal of Climate**, v. 19, n. 20, p. 4977–5000, 2006. DOI: https://doi.org/10.1175/JCLI3896.1

VERDAN, R. Zona de Convergência do Atlântico Sul: uma revisão sistemática e de discurso. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 36, 2025. DOI: https://doi.org/10.55761/abclima.v36i21.19013.

AVALIAÇÃO DE PRODUTOS DE PRECIPITAÇÃO POR SATÉLITE: UMA ABORDAGEM ENTROPIA-TOPSIS NA BACIA DO RIO IBIRAPUITÃ (RS)

1 Ana Carolina dos Santos Reis, 2 Camila Caballero Cristaldo, 3 Gabriel Marques Nascimento, 4 Jean Firmino Cardoso, 5 Francisco Paim de Freitas Neto, 6 Rutineia Tassi, 7 Alejandro Ruiz-Padillo, 8 Daniel Gustavo Alasia Piccili

1Universidade Federal de Santa Maria, e-mail:reis.ana@acad.ufsm.br; 2Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: camicaba2601@gmail.com; 3Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: gabriel-nascimento.1@acad.ufsm.br; 4Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: jean.firmino@ufpe.br; 5Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: francisco.freitas@acad.ufsm.br; 6Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: ruti@ufsm.br; 7Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: alejandro.ruiz-padillo@ufsm.br; 8Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: dallasia@gmail.com

Palavras-chave: decisão multicritério; eventos extremos; avaliação estatística.

Resumo

A estimativa da precipitação é essencial para estudos hidrológicos e a análise de eventos extremos. Em regiões com baixa densidade de estações pluviométricas, os produtos de precipitação por satélite (SPPs) se constituem em uma alternativa relevante, embora possam apresentar incertezas com relação à magnitude e à detecção de eventos. Neste estudo, diferentes SPPs foram avaliadas e classificadas, por meio de uma abordagem multicritério baseada na integração dos métodos de Entropia máxima e TOPSIS, com relação ao seu desempenho na estimativa da precipitação na região da bacia hidrográfica do rio Ibirapuitã (RS). Foram analisadas as séries de precipitação máxima diária mensal no período de 2005 a 2020 dos produtos dos satélites CHIRPS, CMORPH, GPM IMERG (Early, Late e Final), PERSIANN-CDR e MSWEP, tendo como referência dados observados em estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). O desempenho dos diferentes satélites na estimativa da precipitação foi quantificado por meio de métricas contínuas para avaliar o indicador de magnitude do evento (CC, RMSE, MAE e KGE) e categóricas para avaliar a capacidade de detecção (POD, FAR, CSI). A abordagem Entropia-TOPSIS foi utilizada para a integração de múltiplos critérios de análise, e mostrou-se uma abordagem eficiente, objetiva e robusta para o ranqueamento dos SPPs. Os resultados indicaram diferenças de desempenho significativas entre os diferentes SPPs na estimativa da precipitação máxima diária mensal. O MSWEP destacou-se dentre os demais, sendo classificado em 1° lugar segundo o TOPSIS. O GPM IMERG Final também teve bom desempenho na detecção de eventos de precipitação. O CHIRPS, CMORPH e PERSIANN-CDR apresentaram os menores indicadores de desempenho, especialmente para os eventos extremos.

Introdução

A precipitação é um dos principais componentes do ciclo hidrológico, exercendo papel fundamental na dinâmica climática e nos processos hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais (Papalexiou; Montanari, 2019). A frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação são os principais fatores desencadeadores de desastres naturais, como inundações e deslizamentos de terra, gerando impactos significativos de ordem social, econômica e ambiental. Nesse contexto, a obtenção de dados de precipitação confiáveis, precisos e com adequada resolução espacial e temporal é essencial para a ampliação da base de dados de monitoramento hidrometeorológico, previsão de eventos extremos e suporte à gestão de recursos hídricos (Wan *et al.*, 2025).

Tradicionalmente, a obtenção de dados de precipitação é realizada por meio de observações diretas em nível de superfície, através do monitoramento em pluviômetros (Kidd *et al.*, 2017) e estimativas em radares meteorológicos (Zhang *et al.*, 2016). No entanto, essas medições frequentemente apresentam limitações, em função de falhas nas leituras, séries curtas, baixa densidade da rede de monitoramento e distribuição espacial irregular. Tais limitações dificultam a representação da variabilidade espacial da precipitação, especialmente em regiões montanhosas, remotas ou com infraestrutura de monitoramento limitada (Kumar *et al.*, 2022; Tapiador *et al.*, 2012). Essas restrições são comuns em países em desenvolvimento, como o Brasil, onde a cobertura observacional é frequentemente insuficiente para análises hidrológicas mais detalhadas (Xavier; King; Scanlon, 2016).

Diante disso, dados de precipitação originados de técnicas de detecção remota, representam uma forma promissora de superar as limitações da medição direta e auxiliar a complementação da rede de monitoramento hidrometeorológico. A detecção da precipitação por satélite (*Satellite Precipitation Products* – SPPs) é obtida em sistemas multifonte, altamente sofisticados, incluindo diferentes tipos de sensores e plataformas orbitais, que utilizam bandas espectrais distintas, como infravermelho e micro-ondas (Conte; Tassi; Bayer, 2026). Dentre os SPPs amplamente utilizados em estudos hidrológicos e climáticos, destacam-se aqueles cujos dados se diferem quanto às fontes de informação, metodologias de estimativa e estratégias de calibração.

O CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations*), por exemplo, é um produto híbrido que combina observações na faixa do infravermelho, imagens de satélites e observações de pluviômetros através de técnicas de interpolação para estimar a precipitação (Funk *et al.*, 2015). Outros produtos utilizam abordagens baseadas na integração de múltiplos sensores e técnicas avançadas de modelagem, como o PERSIANN (*Precipitation Estimation From Remotely Sensed*

Information Using Artificial Neural Networks), que combina dados provenientes de satélites geoestacionários e de órbita baixa com informações topográficas da superfície terrestre, por meio de redes neurais artificiais (Sorooshian *et al.*, 2000; Hsu *et al.*, 1997). Já o CMORPH (*Climate Prediction Center Morphing Technique*) baseia-se na propagação de estimativas de precipitação derivadas de sensores de micro-ondas ao longo do tempo e espaço, e utiliza informações de vetores de movimento obtidas a partir de dados infravermelhos, o que permite estimativas de precipitação de meia hora, de hora em hora e diárias (Joyce *et al.*, 2004).

Dentre os produtos mais recentes, destaca-se o GPM IMERG (*Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM*), desenvolvido no âmbito da missão GPM, que combina dados de múltiplos sensores de micro-ondas e infravermelho, além de ajustes com dados de superfície. O GPM IMERG apresenta estimativas com elevada resolução espacial e temporal e diferentes níveis de latência, o que possibilita sua aplicação tanto em tempo real quanto em análises retrospectivas (Tan *et al.*, 2019). Por fim, o MSWEP (*Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation*) representa uma abordagem integrada que combina dados de satélite, pluviômetros e reanálises climáticas, sendo especialmente desenvolvido para aplicações hidrológicas e reconhecido por sua capacidade de representar padrões espaciais e temporais da precipitação com maior consistência (Beck *et al.*, 2019).

Diante da gama de opções disponíveis, Conte, Tassi e Bayer (2026), em uma revisão sistemática global baseada em mais de 600 estudos, destacam o papel fundamental dos SPPs na análise de eventos extremos, modelagem climática e sistemas de alerta precoce. No entanto, o desempenho desses produtos varia significativamente de região em região, em função de fatores como topografia, tipo de precipitação e sazonalidade, o que torna a garantia da eficiência e a eficácia na estimativa da precipitação, uma tarefa desafiadora em regiões com relevo complexo ou dominadas por sistemas convectivos intensos, como ocorre em grande parte do território brasileiro. Ainda, segundo as autoras, embora produtos amplamente utilizados, como GPM IMERG e CHIRPS, apresentem bom desempenho geral, persistem incertezas na estimativa da magnitude e na detecção de eventos extremos de precipitação, com tendência à superestimativa ou subestimativa, a depender da região e da escala temporal analisada.

Nesse contexto, abordagens baseadas em tomada de decisão multicritério (*Multi-Criteria Decision Making - MCDM*) têm sido cada vez mais empregadas para auxiliar na seleção dos SPPs mais adequados. Kumar *et al.* (2022), por exemplo, desenvolveram um framework integrado para avaliação do desempenho de diferentes SPPs em regiões montanhosas com escassez de dados no Himalaia, por meio de múltiplos indicadores estatísticos com técnicas de MCDM. O estudo avaliou oito SPPs por meio de métricas categóricas e contínuas, além de investigar a aplicabilidade destes produtos em modelagem hidrológica. Para a etapa de ranqueamento, os autores utilizaram o método da Entropia máxima e o *Compromise Programming* para determinação dos pesos dos indicadores e integração de múltiplas métricas em um único índice de desempenho. Os resultados destacaram o desempenho superior do CMORPH e do GPM IMERG Final, como os produtos mais bem classificados.

De forma similar, Dayal *et al.* (2023) aplicaram uma abordagem multicritério para avaliar e classificar, a partir de métricas de desempenho e decomposição de erros em componentes sistemáticos e aleatórios, diferentes SPPs em distintas zonas agroclimáticas da Índia. Os autores analisaram produtos baseados exclusivamente em satélite e produtos calibrados com dados de pluviômetros. No estudo, foi utilizado o método *Weighted Sum Approach* (WSA), no qual os indicadores de desempenho foram ponderados com base em uma matriz de correlação, o que permitiu a integração de múltiplos critérios em um índice composto. Os resultados destacaram a superioridade de produtos baseados na missão GPM, como IMERG, bem como de produtos calibrados, como GSMaP, e reforçou a importância de abordagens multicritério na seleção de SPPs.

Assim, torna-se evidente a necessidade de abordagens que integrem múltiplos critérios na avaliação de SPPs, especialmente em regiões onde a variabilidade climática e a ocorrência de eventos extremos representam desafios adicionais. No presente estudo, uma abordagem da análise multicritério baseada na integração das técnicas da Entropia máxima e *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) foi aplicada para avaliar as séries de precipitações máximas mensais estimadas a partir de diferentes SPPs na região da bacia hidrográfica do rio Ibirapuitã, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Indicadores estatísticos contínuos e categóricos foram utilizados para avaliar o desempenho dos diferentes SPPs na estimativa destas precipitações, tomando como referência os dados observados em superfície. A análise permitiu identificar os produtos mais adequados para a representação da precipitação na área de estudo, com ênfase na análise de eventos extremos, e contribuir para o suporte à gestão de riscos associados a inundações recorrentes naquela região.

Metodologia

Área de estudo

A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do rio Ibirapuitã (tributário do rio Uruguai), localizada entre as latitudes 29°45’S e 30°50’S longitudes 55°10’ W e 56°05’W no estado do Rio Grande do Sul, Brasil (SEMA, 2010). Do ponto de vista topográfico, a bacia apresenta altitudes que variam entre 353 a 53 m, predominando altitudes inferiores a 160 m em grande parte da área. O relevo caracteriza-se principalmente por formas suavemente onduladas, com cerca de 93% da área apresentando declividades inferiores a 15%, enquanto áreas mais planas concentram-se nas proximidades do baixo curso do rio e das principais drenagens (Menezes et al., 2017). A Figura 01 apresenta as principais informações sobre a bacia hidrográfica.

A região está inserida no domínio do clima subtropical úmido, com precipitação média anual que varia entre aproximadamente 1400 e 1600 mm. As temperaturas médias anuais situam-se entre 14 °C e 25 °C, com verões quentes e invernos frios, podendo ocorrer episódios de geadas durante o inverno devido à incursão de massas de ar polar. A dinâmica climática da região é fortemente influenciada pela passagem frequente de frentes frias, responsáveis por grande parte dos eventos de precipitação no sul do Brasil (Wrege, 2012).

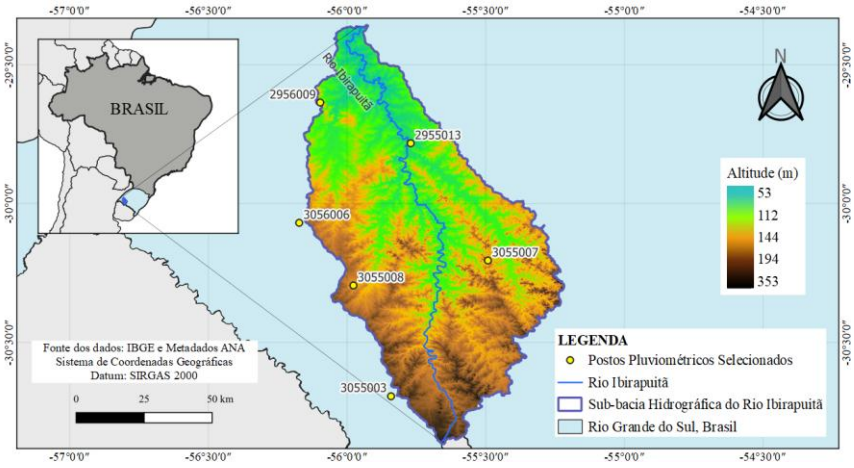


Figura 01: Localização da área de estudo, com destaque para os postos pluviométricos selecionados como referência. Fonte: IBGE, ANA. Elaborado pelos autores (2026).

Rede de monitoramento pluviométrica utilizada na análise

As medições de precipitação baseadas em pluviômetros foram extraídas a partir de postos sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Ao todo, foram identificados 11 postos pluviométricos bem distribuídos ao longo da área de estudo. Dentre estes, foram selecionados 6 postos para a análise, priorizando os que apresentaram séries históricas com dados mais recentes, entre 2005 e 2020, definido como período de referência nesse estudo (Figura 01).

Para cada um dos postos, foram utilizados dados observados de precipitação diária, a partir dos quais foi derivada a série de precipitação máxima diária mensal, adotada como referência para a avaliação do desempenho dos SPPs. Foram excluídos os meses que apresentaram ausência de registros diários, evitando, assim, a introdução de incertezas adicionais nos resultados (Kumar *et al.*, 2022; Tabela 01).

Posto ANA	2955013	2956009	3055003	3055007	3055008	3056006
Nome	Alegrete	Fazenda Três Capões	Fazenda Encerra	São Carlos	Passo da Guarda	Harmonia
Coordenadas	(-29,78; -55,77)	(-29,63; -56,09)	(-30,69; -55,84)	(-30,20; -55,49)	(-30,29; -55,98)	(-30,07; -56,17)
Falhas (%)	3,47	4,59	6,37	12,82	6,84	8,73

Tabela 01: Percentual de falhas e informações espaciais dos postos pluviométricos analisados (2005-2020). Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

SPPs analisados

Ao todo, foram escolhidos sete SPPs para aplicação da metodologia proposta neste estudo: CHIRPS, CMORPH, GPM IMERG Early, GPM IMERG Late, GPM IMERG Final, PERSIANN-CDR e MSWEP. As principais características destes SPPs estão apresentadas na Tabela 02. A escolha destes SPPs deveu-se à ampla utilização destes produtos em estudos hidrológicos e climáticos (Funk *et al.*, 2015; Eini; Rahmati; Piniewski, 2022; Liu *et al.*, 2022; Saravanan *et al.*, 2025).

Produto	Dados de Entrada	Frequência Mínima	Resolução Espacial	Cobertura Temporal	Referência
CHIRPS	Dados infravermelhos (CCD), imagens de satélite e pluviômetros	diária	0,05° × 0,05°	1981-Presente	Funk *et al.* (2015)
CMORPH	Observações de micro-ondas de satélites e dados infravermelhos geoestacionários	30 min	0,25° × 0,25°	2002-Presente	(Joyce *et al.*, 2004)
GPM IMERG Early	Micro-ondas, infravermelho e dados auxiliares	30 min	0,1° × 0,1°	2000-Presente	(Huffman *et al.*, 2020)
GPM IMERG Late	Mesmo do GPM IMERG Early	30 min	0,1° × 0,1°	2000-Presente	(Huffman *et al.*, 2020)
GPM IMERG Final	Mesmo do GPM IMERG Late + dados de pluviômetros	30 min	0,1° × 0,1°	2000-Presente	(Huffman *et al.*, 2020)
PERSIANN-CDR	Dados infravermelhos e GPCP	diária	0,25° × 0,25°	1983-Presente	(Ashouri *et al.*, 2015)
MSWEP v2.8	Integração de dados de satélite, pluviômetros e reanálises climáticas	3 h	0,1° × 0,1°	1979-Presente	(Beck *et al.*, 2019)

Tabela 02: Produtos de precipitação estimados por satélites analisados. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Para fins de análise, as séries temporais do SPPs foram processadas e reamostradas, de modo a representar os valores de precipitação máxima diária mensal, considerando o período de janeiro de 2005 a dezembro de 2020. Para fins de comparação, os dados observados provenientes dos 6 postos pluviométricos da rede da ANA foram utilizados como referência, sendo adotada uma abordagem ponto-a-grade, na qual os valores de precipitação estimados nos diferentes satélites foram comparados aos registros das estações pluviométricas mais próximas.

Métricas de desempenho dos SPPs

Para avaliar o desempenho dos SPPs, foram adotadas duas abordagens estatísticas, uma de verificação contínua e uma de verificação categórica. A abordagem contínua foi utilizada para avaliar a concordância da magnitude dos valores observados por pluviômetros e estimados pelos SPPs. Para isso, foram empregados: i) Coeficiente de Correlação de Pearson (CC), que mede a relação linear entre os conjuntos de dados; ii) Erro Quadrático Médio (RMSE); iii) Erro Absoluto Médio (MAE), que quantificam a magnitude dos erros de estimativa; e iv) Eficiência de Kling-Gupta (KGE), que integra correlação, viés e variabilidade (Gupta *et al.*, 2009; Gupta; Sorooshian; Yapo, 1999).

A avaliação categórica seguiu as recomendações de Wilks (2006), sendo, neste estudo, adaptada para uma abordagem baseada em tolerância relativa. As estimativas foram classificadas com base em um critério de tolerância relativa de 20% em relação aos valores observados. Foram considerados acertos (H) os casos em que os valores estimados se mantiveram dentro desse intervalo de tolerância. Por outro lado, quando as estimativas ultrapassaram esse limite, a classificação foi definida de acordo com o sinal do erro: falhas (M), quando houve subestimativa superior ao limite de 20%, e falsos alarmes (F), quando houve superestimativa além desse mesmo intervalo. A partir dessa classificação, foram calculadas as métricas categóricas: i) Probabilidade de Detecção (POD), que avalia a capacidade de identificar corretamente os eventos de precipitação; ii) Razão de Falso Alarme (FAR), que quantifica a proporção de eventos superestimados; e iii) Índice de Sucesso Crítico (CSI), que fornece uma medida global de desempenho. A Tabela 03 apresenta as métricas de desempenho utilizadas na análise.

Métrica	Fórmula	Interpretação
CC (Coeficiente de Correlação)	$CC = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(S_i - \bar{S})^2}}$	Varia de -1 a 1. Valores próximos de 1 indicam forte correlação positiva.
RMSE (*Root Mean Square Error*)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}$	Quanto menor, melhor o desempenho do produto.
MAE (*Mean Absolute Error*)	$\text{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\lvert S_i - O_i \rvert)$	Quanto menor, melhor o desempenho.
KGE (*Kling-Gupta Efficiency*)	$\text{KGE} = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2}$	Valores próximos de 1 indicam melhor desempenho.
POD (*Probability of Detection*)	$POD = \frac{H}{H+M}$	Valores próximos de 1 indicam melhor detecção.
FAR (*False Alarm Ratio*)	$FAR = \frac{F}{H+F}$	Valores próximos de 0 indicam melhor desempenho.
CSI (*Critical Success Index*)	$CSI = \frac{H}{H+M+F}$	Valores próximos de 1 indicam melhor desempenho.

Tabela 03: Métricas estatísticas e categóricas calculadas para comparação.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Ranqueamento dos SPPs pelo método Entropia-TOPSIS

O ranqueamento dos SPPs foi realizado por meio da integração dos métodos de Entropia máxima de Shannon e TOPSIS, que em conjunto formam uma estrutura robusta de tomada de decisão, uma vez que eliminam a subjetividade e inconsistências causadas por opiniões humanas (Chatterjee; Chakraborty, 2024). Inicialmente, os pesos dos critérios foram determinados pelo método da Entropia de Shannon que quantifica o grau de informação contido em cada variável, atribuindo maior peso àquelas que apresentam maior variabilidade e, assim, maior capacidade de discriminação entre as alternativas (Shannon, 1948).

Os critérios foram separados em indicadores de benefício (CC, KGE, POD e CSI) e de custo (RMSE, MAE e FAR). Em seguida, foi aplicado o método TOPSIS, que se baseia no conceito de que a melhor alternativa deve apresentar a menor distância da solução ideal positiva e a maior distância da solução ideal negativa, a partir do cálculo do índice de similaridade ao ideal (*Ci*) que define o ranking final das alternativas. Consultar Shannon (1948) e Hwang; Yoon (1981) para mais detalhes.

Resultados e Discussão

As séries temporais de precipitação por pluviômetros e estimadas pelos SPPs, além do o gráfico de dispersão estão apresentados na Figura 02. De forma geral, os SPPs conseguem reproduzir a tendência temporal da precipitação, com comportamento semelhante ao observado. No entanto, observa-se que a maioria dos SPPs apresenta dificuldades em representar a magnitude das precipitações extremas, com frequentes casos de subestimativa, especialmente nos produtos CHIRPS e CMORPH.

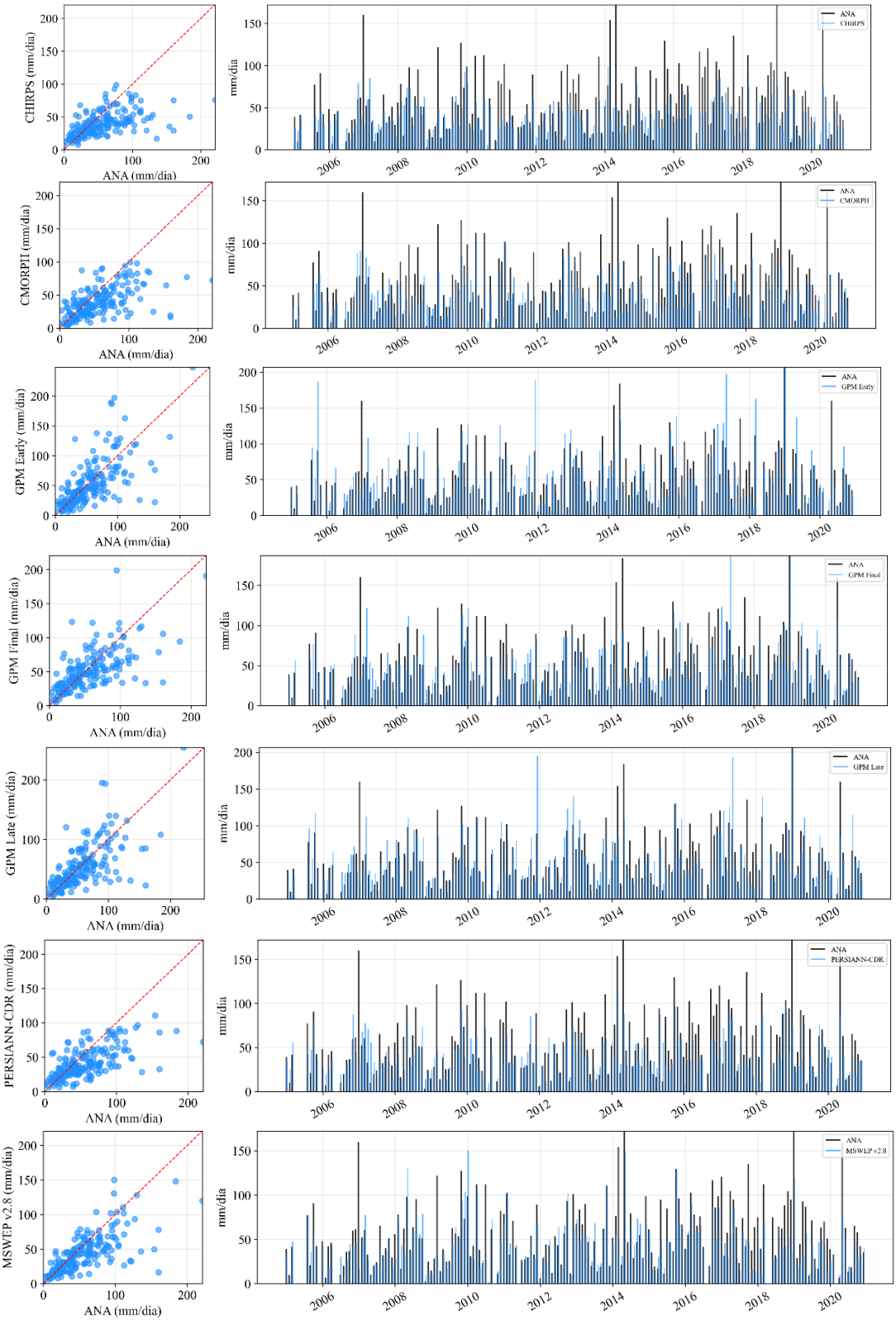


Figura 02: Avaliação dos SPPs, com base em gráficos de dispersão e séries temporais.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Dentre os SPPs avaliados, o GPM IMERG Final apresenta melhor desempenho na reprodução dos eventos de maior intensidade, sendo capaz de capturar parte dos picos observados, principalmente a partir de 2014, período em que há maior consistência entre as séries. Ainda assim, são observados episódios de superestimativa pontual, principalmente nas versões Early e Late, indicando maior variabilidade nas estimativas. O produto PERSIANN-CDR apresenta uma menor amplitude dos valores estimados quando comparado aos dados observados. Por sua vez, o MSWEP v2.8 apresenta desempenho intermediário, com melhor capacidade de reproduzir a variabilidade geral e alguns eventos de maior magnitude, quando comparado aos demais produtos.

A Tabela 04 apresenta um resumo das métricas de desempenho para cada um dos SPPs. De forma geral, a análise conjunta das métricas contínuas e categóricas indica que os produtos GPM IMERG Final e MSWEP apresentam o melhor desempenho global dentre os SPPs avaliados. O MSWEP destaca-se pelo maior coeficiente de correlação (0,73), menores erros (RMSE = 23,6; MAE = 16,0) e melhor eficiência (KGE = 0,67), além de apresentar o melhor equilíbrio entre detecção e erro, com menor FAR (0,37) e maior CSI (0,39). O GPM IMERG Final também apresenta desempenho consistente, com bons resultados nas métricas contínuas (RMSE = 23,9; KGE = 0,65) e o maior POD (0,57), indicando maior capacidade de detecção, embora com maior ocorrência de falsos alarmes em comparação ao MSWEP (0,48). As versões GPM IMERG Early e Late apresentam desempenho intermediário, com boa detecção, porém maiores erros e valores mais elevados de falsos alarmes. Por outro lado, os produtos CHIRPS, CMORPH e PERSIANN-CDR apresentam, em geral, desempenhos inferiores, com menores valores de correlação (0,57-0,62), maiores erros e menor eficiência (KGE < 0,52), além de baixa capacidade de detecção (POD < 0,42) e menores valores de CSI.

Embora todos os produtos apresentem limitações, os resultados indicam que especialmente na representação de eventos extremos, o MSWEP se destaca pelo melhor equilíbrio entre erro e detecção, enquanto o GPM Final apresenta maior capacidade de identificar eventos, sendo ambos os mais adequados para aplicações hidrológicas na área de estudo.

SPP	CC	RMSE	MAE	KGE	POD	FAR	CSI
CHIRPS	0,62	26,83	18,42	0,42	0,42	0,43	0,31
CMORPH	0,60	27,89	19,74	0,52	0,37	0,48	0,27
GPM Early	0,63	29,73	20,73	0,58	0,50	0,53	0,32
GPM Late	0,66	28,09	19,58	0,62	0,51	0,54	0,32
GPM Final	0,69	23,91	16,77	0,65	0,57	0,48	0,37
MSWEP	0,73	23,56	16,04	0,67	0,50	0,37	0,39
PERSIANN	0,62	27,14	19,27	0,45	0,36	0,45	0,28

Tabela 04: Desempenho estatístico dos SPPs com base em métricas contínuas e categóricas.
Fonte: Autores (2026).

Os pesos obtidos pelo método da Entropia máxima indicam distribuição relativamente equilibrada entre as métricas, com leve predominância das métricas categóricas. O CSI apresenta o maior peso (16,14%), seguido por FAR (15%) e POD (14,91%). Entre as métricas contínuas, CC e MAE têm maior relevância (15,26 e 13,67%), enquanto o RMSE apresenta o menor peso (12,61%). A Tabela 05 mostra a definição dos pesos usados na etapa posterior de ranqueamento.

Métricas Contínuas			Métricas Categóricas		
Critério	Entropia	Peso (%)	Critério	Entropia	Peso (%)
CC	0,82	15,26	POD	0,82	14,91
RMSE	0,85	12,16	FAR	0,82	15,23
MAE	0,84	13,67	CSI	0,81	16,14
KGE	0,85	12,61			

Tabela 05: Pesos dos critérios obtidos pelo método da Entropia máxima para avaliação dos SPPs.
Fonte: Autores (2026).

Os resultados do método TOPSIS, apresentados na Tabela 06, evidenciam uma clara hierarquia de desempenho entre os SPPs avaliados. O MSWEP apresentou o melhor desempenho global (*Ci* = 0,84), com melhor equilíbrio entre as métricas consideradas. Em seguida, o GPM Final (0,73) também apresentou desempenho elevado, seguido pelo GPM Late (0,48) e GPM Early (0,42), com desempenho intermediário, indicando boa capacidade de representação, porém inferior à versão final do GPM, o que reforça a importância dos ajustes e calibrações. Por outro lado, os produtos CHIRPS (0,34), PERSIANN-CDR (0,23) e CMORPH (0,22) apresentam os menores valores de *Ci*, evidenciando desempenho inferior no conjunto das métricas avaliadas.

SPP	MSWEP	GPM IMERG Final	GPM IMERG Late	GPM IMERG Early	CHIRPS	PERSIANN-CDR	CMORPH
Ci	0.84	0.73	0.48	0.42	0.34	0.23	0.22
Classificação	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°

Tabela 06: Classificação dos SPPs com base no método multicritério Entropia-TOPSIS
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Conclusões

O presente estudo permitiu avaliar de forma integrada o desempenho de sete SPPs na bacia hidrográfica do rio Ibirapuitã, evidenciando diferenças significativas na capacidade de representação da precipitação máxima mensal. De forma geral, os resultados demonstram que produtos mais recentes e que incorporam múltiplas fontes de dados e calibração, como o MSWEP e o GPM Final, apresentam desempenho superior, enquanto produtos mais antigos ou com menor nível de integração de dados tendem a apresentar maiores limitações, sobretudo na representação de eventos extremos. O MSWEP apresentou o melhor desempenho global, destacando-se pelo equilíbrio entre menor erro e maior consistência estatística, enquanto o GPM Final demonstrou maior capacidade de detecção de eventos, sendo a melhor alternativa entre os produtos baseados exclusivamente em satélite. Os produtos GPM Early e GPM Late apresentaram desempenho intermediário, enquanto CHIRPS, CMORPH e PERSIANN-CDR mostraram limitações mais expressivas, sobretudo na representação da magnitude dos eventos extremos. Esses resultados reforçam que a escolha do produto deve considerar não apenas a correlação com dados observados, mas também a capacidade de detecção e a ocorrência de erros associados. A abordagem multicritério mediante a aplicação Entropia-TOPSIS mostrou-se eficiente, permitindo a identificação objetiva dos produtos mais adequados e reduzindo a subjetividade na análise. Dessa forma, conclui-se que abordagens multicritério representam uma ferramenta robusta para a seleção de SPPs, contribuindo para aplicações hidrológicas mais confiáveis e para o suporte à gestão de riscos associados a eventos extremos de precipitação.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e, também, pelas bolsas de Produtividade em Pesquisa - Processos nº 310073/2025-1 e 305384/2025-2. Agradece-se também ao grupo de pesquisa Ecotecnologias do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental Universidade Federal de Santa Maria (PPGECAM/UFSM) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ASHOURI, H. et al. PERSIANN-CDR: Daily Precipitation Climate Data Record from Multisatellite Observations for Hydrological and Climate Studies. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 96, n. 1, p. 69–83, 2015.

BECK, H. E. et al. MSWEP V2 Global 3-Hourly 0.1° Precipitation: Methodology and Quantitative Assessment. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 100, n. 3, p. 473–500, 2019.

CHATTERJEE, S.; CHAKRABORTY, S. A study on the effects of objective weighting methods on TOPSIS-based parametric optimization of non-traditional machining processes. Decision Analytics Journal, v. 11, p. 100451, 2024.

CONTE, L. C.; TASSI, R.; BAYER, D. M. Satellite-Based Rainfall Datasets: A Global Systematic Review of Applications, Accuracy, and Research Gaps. IEEE Access, v. 14, p. 29539–29565, 2026.

DAYAL, D. et al. Multi-criteria evaluation of satellite-based precipitation estimates over agro-climatic zones of India. Atmospheric Research, v. 292, p. 106879, 2023.

EINI, M. R.; RAHMATI, A.; PINIEWSKI, M. Hydrological application and accuracy evaluation of PERSIANN satellite-based precipitation estimates over a humid continental climate catchment. Journal of Hydrology: Regional Studies, v. 41, p. 101109, 2022.

FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. Scientific Data, v. 2, n. 1, p. 150066, 2015.

GUPTA, H. V. et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. Journal of Hydrology, v. 377, n. 1–2, p. 80–91, 2009.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. Journal of Hydrologic Engineering, v. 4, n. 2, p. 135–143, 1999.

HSU, K. et al. Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks. Journal of Applied Meteorology, v. 36, n. 9, p. 1176–1190, 1997.

HUFFMAN, G. J. et al. Integrated Multi-satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission (IMERG). In: LEVIZZANI, V. et al. (org.). Satellite Precipitation Measurement. Cham: Springer International Publishing, 2020. (Advances in Global Change Research). v. 67, p. 343–353.

HWANG, C.-L.; YOON, K. Multiple Attribute Decision Making. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981. (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems). v. 186.

JOYCE, R. J. et al. CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution. Journal of Hydrometeorology, v. 5, n. 3, p. 487–503, 2004.

KIDD, C. et al. So, How Much of the Earth's Surface Is Covered by Rain Gauges? Bulletin of the American Meteorological Society, v. 98, n. 1, p. 69–78, 2017.

KUMAR, S. et al. Assessing the Performance of the Satellite-Based Precipitation Products (SPP) in the Data-Sparse Himalayan Terrain. Remote Sensing, v. 14, n. 19, p. 4810, 2022.

LIU, Y. et al. Evaluating the Performance of Satellite-Based Precipitation Products Using Gauge Measurement and Hydrological Modeling: A Case Study in a Dry Basin of Northwest China. Journal of Hydrometeorology, v. 23, n. 4, p. 541–559, 2022.

MENEZES, D. J. et al. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã - RS. In: OS DESAFIOS DA GEOGRAFIA FÍSICA NA FRONTEIRA DO CONHECIMENTO. [S. l.]: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP, 2017. p. 574–583. DOI: https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.1827

PAPALEXIOU, S. M.; MONTANARI, A. Global and Regional Increase of Precipitation Extremes Under Global Warming. Water Resources Research, v. 55, n. 6, p. 4901–4914, 2019.

SARAVANAN, A. et al. Evaluation of remote-sensing- and reanalysis-based precipitation products for agro-hydrological studies in the semi-arid tropics of Tamil Nadu. Hydrology and Earth System Sciences, v. 29, n. 19, p. 4847–4870, 2025.

SHANNON, C. E. A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal, New York, v. 27, n. 3, p. 379–423, 1948.

SOROOSHIAN, S. et al. Evaluation of PERSIANN System Satellite–Based Estimates of Tropical Rainfall. Bulletin of the American Meteorological Society, Boston, v. 81, n. 9, p. 2035-2046, 2000.

TAN, J. et al. IMERG V06: Changes to the Morphing Algorithm. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 36, n. 12, p. 2471–2482, 2019.

TAPIADOR, F. J. et al. Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications. Atmospheric Research, v. 104-105, p. 70-97, 2012. DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.10.021.

WAN, Y. et al. Evaluation of six latest precipitation datasets for extreme precipitation estimates and hydrological application across various climate regions in China. Atmospheric Research, v. 315, p. 107932, 2025.

WREGE, Marcos Silveira; STEINMETZ, Silvio; REISSER JÚNIOR, Carlos; ALMEIDA, Ivan Rodrigues de (Ed.). Atlas climático da Região Sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Brasília, DF: Embrapa, 2012.

WILKS, D. S. Statistical methods in the atmospheric sciences. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2006. (International geophysics series, v. 91).

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). International Journal of Climatology, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.

ZHANG, J. et al. Multi-Radar Multi-Sensor (MRMS) Quantitative Precipitation Estimation: Initial Operating Capabilities. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 97, n. 4, p. 621–638, 2016.

ANÁLISE DOS SOLOS ANTRÓPICOS NA APA ARAGUAIA (ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DE SÃO GERALDO DO ARAGUAIA)

1 Jamilly Samira dos Santos Vaz; 2 Viviane da Silva Matos; 3 Tácila Marinho Rodrigues; 4 Maria da Conceição Rabelo Gomes; 5 Marciano Grokaliski; 6 Marlon Prado; 7 Luiz Eduardo Chaves de azevedo; 8 José Antonio de Castro Silva.

1 Fundação Casa da Cultura de Marabá, e-mail: jamillyvaz017@gmail.com; 2 Fundação Casa da Cultura de Marabá e-mail: matosviviane797@gmail.com 3Universidade do Estado do Pará, e-mail: tacilamarinho9@gmail.com 4 Universidade do Estado do Pará, maria.dcr.gomes@uepa.br ; 5Fundação Casa da Cultura de Marabá, e-mail: marciano.grokaliski@gmail.com ; 5Fundação Casa da Cultura de Marabá, marlonprado333@gmail.com 7 Universidade do Estado do Pará, e-mail: luiz.azevedo@uepa.br; 8 Universidade do Estado do Pará, e-mail: joseantonio.silva@uepa.br

Palavras-chave: Terra Preta; Mudanças Climáticas; Carbono.

Resumo

Os solos antrópicos, popularmente conhecidos como Terra Preta de Índio (TPI), ocorrem predominantemente na região Amazônica e diferenciam-se pela coloração escura, alta fertilidade e concentração de matéria orgânica. Este trabalho buscou analisar os solos antrópicos de um sítio arqueológico na área de proteção ambiental (APA Araguaia), localizado no município de São Geraldo do Araguaia, estado do Pará. Para isso, foram coletadas amostras dos solos antrópicos em campo para análise dos parâmetros químicos em três camadas (0-20cm; 20-30cm e 30-40cm). Conclui-se que os solos antrópicos são fundamentais para mitigar as mudanças climáticas, pois além de ser patrimônio natural nacional do setor arqueológico, possuem uma grande relevância ambiental por conter um grande reservatório de carbono o que garante o equilíbrio ecológico mantendo a conservação da APA Araguaia.

Introdução

Os solos antrópicos ou Terra Preta de Índio (TPI), são solos encontrados principalmente na região Amazônica, caracterizados por sua coloração escura, elevada fertilidade e altos teores de matéria orgânica (Lehmann *et al*., 2003; Glaser; Woods, 2014; Schmidt *et al.*, 2021). Entretanto, diferentemente dos solos naturais amazônicos, que são predominantemente ácidos e pobres em nutrientes devido ao intenso intemperismo, as Terras Pretas de Índio (TPI) apresentam concentrações significativamente maiores de fósforo, cálcio, magnésio, carbono orgânico e máteria orgânica (Silva; Mendes; Ramos, 2021).

Vale salientar ainda, que a "Terra Preta Arqueológica", de origem antrópica, ou seja, resultante da ação humana, é encontrada em abundância na área da Vila Santa Cruz (Sítio arqueológico Santa Cruz), inserida no município de São Geraldo do Araguaia, estado do Pará. Estas terras teriam sido produzidas com a combinação de carvão vegetal, cerâmica e matéria orgânica de origem vegetal e animal ao longo de anos de ocupação intensa de povos pretéritos no local (Hilbert, 2025; Grokaliski, 2025).

Dessa forma, a formação dos solos antrópicos está associada à ocupação de povos indígenas pré-colombianos, que ao longo dos séculos, através das suas atividades acabaram por incorporar ao solo resto de resíduos como, ossos, cinzas, carvão vegetal, fragmentos cerâmicos e restos de alimentos. O carvão pirogênico (biochar) é um dos principais componentes responsáveis pela estabilidade da matéria orgânica e pela capacidade de retenção de nutrientes, favorece as atividades microbiológica e a manutenção da fertilidade por longos períodos (Lehmann; Joseph, 2021; Schmidt *et al*., 2021; Kern *et al*., 2021).

Ademais, pesquisas arqueopedológicas demonstram que os povos originários da Amazônia desenvolveram sistemas sofisticados de manejo ambiental, capazes de transformar solos pobres em ambientes altamente férteis. Conforme destaca Kern (2003), a formação das Terras Pretas de Índio revela um conhecimento indígena aprofundado sobre processos de regeneração do solo, manejo de matéria orgânica e conservação ambiental.

Contudo, o solo antrópico tem um papel fundamental para a mitigação das mudanças climáticas. Assim, como pode funcionar em formato de armazenamento para estoque de carbono o que irá ocasiona diretamente no equilibrio ecológico daquela região, pois ainda existem comunidades tradicionais que estão residindo naquele territorio.

Diante dos fatores expostos, o presente estudo busca analisar os parâmetros químicos nos solos antrópicos na APA Araguaia (Área de Proteção Ambiental). De acordo com o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC – Lei nº 9.985/2000), a área se enquadra na categoria de uso sustentável, a qual se encontra com a conservação da natureza em conciliação ao uso direto dos recursos, desde que compatíveis com a conservação ambiental.

Materiais e Métodos

A área da pesquisa localiza-se no município de São Geraldo do Araguaia, com uma área de 3.168 km² e aproximadamente de 24 mil habitantes (IBGE, 2022), no sudeste paraense e possui uma grande relevância ambiental. Tendo em vista, que contém uma unidade de conservação como a APA Araguaia (Figura 1), onde está um dos maiores sítios arqueológicos a céu aberto da região na Vila Santa Cruz. O local apresenta características ambientais típicas da região amazônica, assim como temperatura média variando entre 29°C e 31°C, sob influência de clima tropical quente e úmido (INMET, 2022).

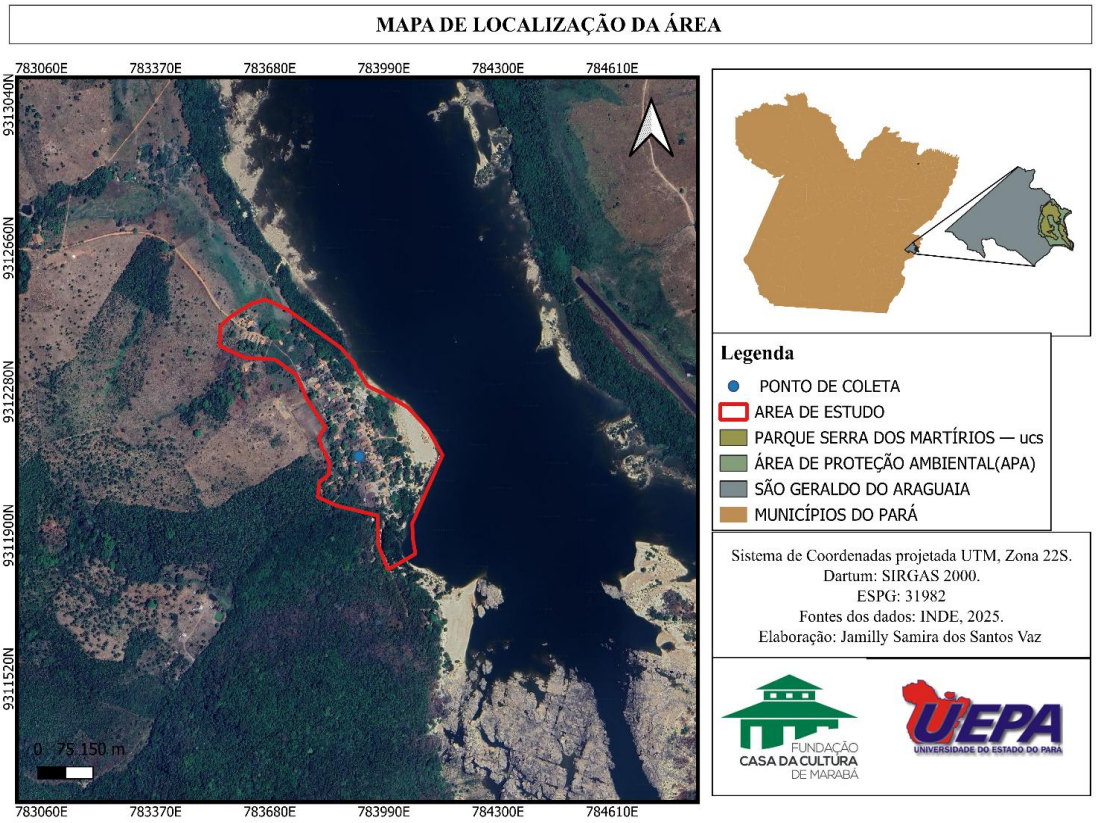


Figura 1: Mapa de Localização da Área de Estudo
Fonte: Autores, (2026).

As amostras foram coletadas em um ponto na Vila Santa Cruz da APA Araguaia (Figura 1), em três camadas com profundidades de 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm, sendo posteriormente encaminhadas ao laboratório para determinação dos atributos químicos. As análises químicas do solo foram realizadas a partir da análise de macronutrientes: Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Alumínio (Al), matéria orgânica (MO), Carbono (C) e pH (água).

Os resultados foram expressos nas unidades mg/dm³ e cmolc/dm³, conforme os métodos de análise química de solos recomendados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2017).

Esta pesquisa adota uma abordagem qualiquantitativa, com base em análises laboratoriais e posterior interpretação dos resultados. Em conformidade com Creswell (2010) e Minayo (2014), essa abordagem possibilita uma análise mais completa da realidade investigada, uma vez que a integração entre dados quantitativos e qualitativos, permitem compreender a atual dinâmica do solo.

O tratamento dos dados obtidos, foi a partir do uso de softwares, como o Excel para a elaboração de tabelas e gráficos dos dados analisados, além do uso do software como o QGIS versão 3.40 para a elaboração do mapa de localização da área.

Resultados e Discussões

✓ Sítios Arqueológicos na APA Araguaia

A unidade de conservação da APA Araguaia, apresenta um dos maiores sítios arqueológicos a céu aberto da região na Vila Santa Cruz, situado no município São Geraldo do Araguaia, no estado do Pará.

No sítio arqueológico Santa Cruz, a sequência estratigráfica do perfil sul da sondagem S23, escavada na área central da atual vila, permite situar a ocupação indígena associada ao horizonte antrópico em um intervalo cronológico relativamente concentrado, compreendido entre 920±30 BP e 770±30 BP, com datações intermediárias de 860±30 BP e 820±30 BP, distribuídas nas três camadas de Terra Preta reconhecidas no perfil. A leitura estratigráfica, associada à identificação de camadas estéreis de areia intrusas no horizonte escuro, interpretadas como registros de episódios de cheias do rio Araguaia, indica uma variação de apenas cerca de 150b ao longo de uma sequência de 120 cm de profundidade, o que autoriza interpretar esse pacote sedimentar como resultado de uma ocupação indígena contínua ou reiterada, arqueologicamente vinculada, no âmbito do sítio, a grupos Tupi pré-coloniais (Hilbert, 2025; Grokaliski, 2025).

Em termos cronológicos, a formação da porção datada desse espesso horizonte antrópico deve ser situada entre os séculos XII e XIII d.C., antes de seu abandono e da posterior descontinuidade ocupacional. Após esse momento, embora não haja evidência estratigráfica local de continuidade equivalente até a reocupação histórica do final do século XIX, dados históricos e etnográficos indicam que a região do Araguaia permaneceu inserida em circuitos de mobilidade e uso indígena, com a possível presença de acampamentos ou ocupações sazonais de outros grupos, como Xambioás, Apinajés e Kaiapós. Já no que se refere à

história mais recente do lugar, a ocupação histórica da atual vila somente se torna documentalmente visível no final do século XIX, uma vez que a Carta da República dos Estados Unidos do Brazil, de 1892, constitui o primeiro documento oficial estudado pela pesquisa com possível referência a Martírios/Santa Cruz (Hilbert, 2025; Grokaliski, 2025).

Na Figura 2, verifica-se que o solo apresenta elevada ocorrência de fragmentos cerâmicos, bem como uma estrutura mais solta quando comparado aos demais solos da região amazônica. Ademais, evidencia atributos físicos típicos de solos antrópicos, indicando modificações decorrentes da ação humana, com implicações na sua estrutura, porosidade e dinâmica hídrica.



Figura 2: Solos antrópicos na APA Araguaia (Área de Proteção Ambiental) - PA
Fontes: Autores (2026)

✓ Análise Química dos Solos Antrópicos

A tabela 1 apresenta os parâmetros químicos dos solos antrópicos de um ponto da APA Araguaia, localizado nas camadas 0-20cm; 20-30cm e 30-40cm.

pH água	**Camada 1 (0-20 cm)**											
5,78	P mg/ dm³	K mg/dm³	K cmolc/dm³	Ca cmolc/dm³	Mg cmolc/ dm³	Al cmolc/dm³	H cmolc/dm³	H+Al cmolc/dm³	C g/kg	MO g/ dm³	Na mg/dm³	
	200,78	29,5	0,075	7,3	2,14	0,02	5,01	5,03	26,61	45,9	0,08	
pH água	**Camada 2 (20-30 cm)**											
5,6	P mg/ dm³	K mg/dm³	K cmolc/dm³	Ca cmolc/dm³	Mg cmolc/ dm³	Al cmolc/dm³	H cmolc/dm³	H+Al cmolc/dm³	C g/kg	MO g/ dm³	Na mg/dm³	
	205,14	37	0,095	10,2	1,79	0,03	5,09	5,12	6,99	12,06	12,5	
pH água	**Camada 3 (30-40 cm)**											
5,79	P mg/ dm³	K mg/dm³	K cmolc/dm³	Ca cmolc/dm³	Mg cmolc/ dm³	Al cmolc/dm³	H cmolc/dm³	H+Al cmolc/dm³	C g/kg	MO g/ dm³	Na mg/dm³	
	196,74	41,5	0,106	9,29	0,74	0,01	4,4	4,41	4,47	7,71	9,5	

Tabela 1: Parâmetros químicos dos solos antrópicos da APA Araguaia
Fonte dos dados: SEMAS, 2024.

Hilbert (2025) descreve algumas das características marcantes da terra preta, como altos valores de fosforo, pótassio, cálcio, magnesio, carbono, materia orgânica, dentre outros. Diante disso, selecionamos 8 parâmetros para análise de macronutriente, sendo o fosforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Carbono (C) Matéria Orgânica (MO) e também pH (acidez do solo). Na figura 3, apresenta-se os valores com os seguintes parâmetros: fosforo e potássio em unidade de mg/dm³. As camadas com cada parâmetro foram distribuídas nos gráficos por unidade de medida seguindo assim um padrão em cada modelo abaixo.

Com base nas análises, observa-se que a análise química do solo revelou valores expressivos para alguns macronutrientes relacionados à fertilidade como o teor de fósforo (P), variando de 196,74 a 200,78 mg/dm³, indicando elevada disponibilidade desse nutriente no solo. O fósforo é considerado um dos principais elementos para o desenvolvimento das plantas, atuando na transferência de energia, formação de raízes e crescimento vegetal (Costa *et al*., 2024; Melo *et al*., 2023).

O potássio (K) é um nutriente essencial para o equilíbrio hídrico das plantas, regulação estomática e resistência a estresses ambientais. Segundo Raij (2011), o potássio desempenha papel fundamental na eficiência do uso da água pelas plantas,

o que se torna especialmente relevante diante das alterações climáticas e do aumento da frequência de períodos de seca. Nas camadas 1, 2 e 3 dos solos analisados, os teores de K foram de 29,5; 37,0 e 41,5 mg/dm³, respectivamente, evidenciando um incremento gradual da concentração de potássio com o aumento da profundidade do perfil do solo.

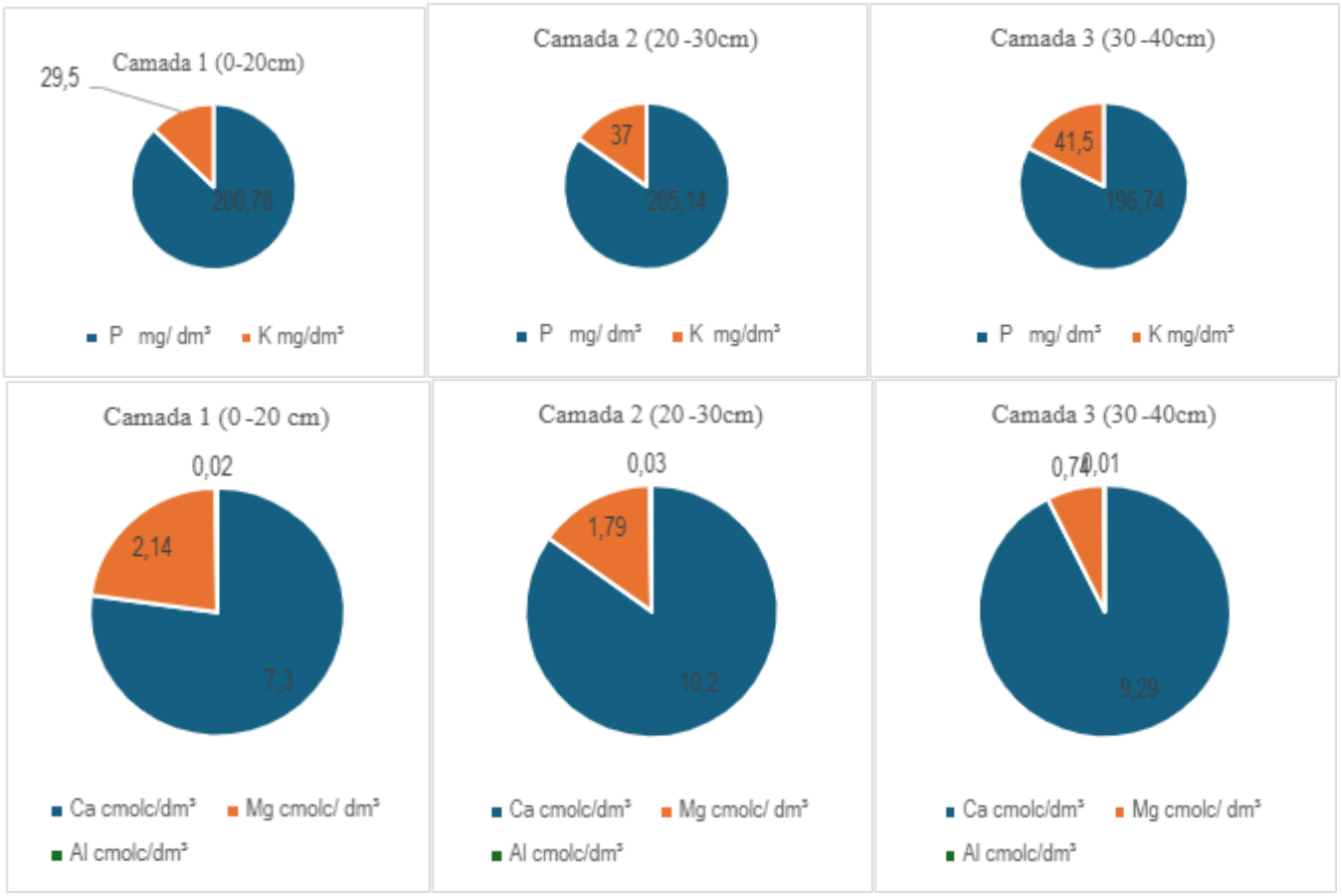


Figura 3: Macronutrientes dos solos antrópicos
Fonte: Autores (2026).

Os valores de pH não mostraram oscilações marcantes entre as camadas, variando de 5,78 na camada 1; 5,60 na camada 2 e 5,79 na camada 3 (Figura 4). Estes resultados apresentam equilíbrio com o meio, pois de acordo com a Embrapa, os solos podem variar sua acidez entre 5,5 e 6 e estar de acordo com a Resolução do CONAMA 420/2009 que é uma legislação que define esses valores como preferência de um solo (EMBRAPA, 2026).

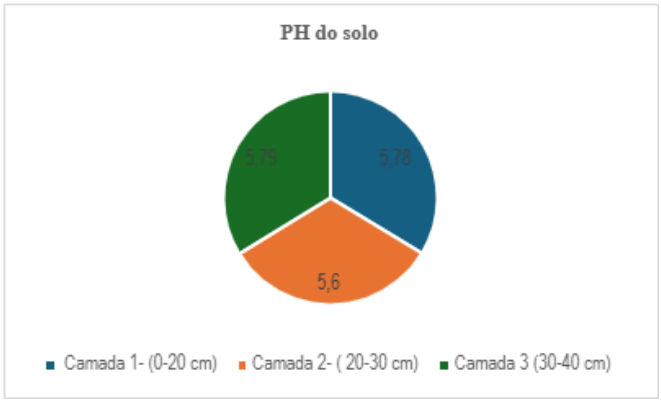


Figura 4: pH dos solos antrópicos
Fonte: Autores (2026)

Os resultados obtidos indicam uma clara variação nos teores de carbono orgânico (C) e matéria orgânica (MO) entre as camadas analisadas. Em ordem decrescente, a amostra 1 apresentou os maiores valores (C = 26,61 g/kg; MO = 45,9 g/dm³), seguida pela amostra 2 (C = 6,99 g/kg; MO = 12,06 g/dm³) e por último, pela amostra 3 (C = 4,47 g/kg; MO = 7,71 g/dm³)

(Figura 5). Essa organização demonstra que, à medida que se avança para camadas mais profundas do solo, ocorre redução nos teores de matéria orgânica e carbono, comportamento esperado devido à menor deposição de resíduos orgânicos e menor atividade biológica em profundidade.

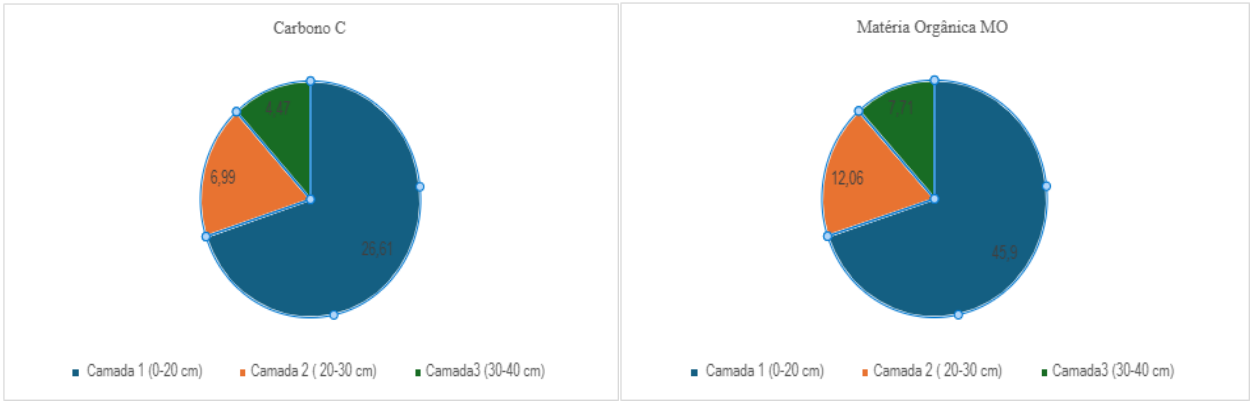


Figura 5: Relação entre Matéria Orgânica e Carbono com o Solo
Fonte: Autores, (2026).

O destaque da camada 1 reforça a relevância das camadas superficiais, especialmente em solos antrópicos, como importantes reservatórios de carbono. Esses ambientes apresentam elevado potencial de sequestro de carbono, contribuindo diretamente para a mitigação das mudanças climáticas ao reduzir a concentração de CO_2 na atmosfera. Além disso, o acúmulo de matéria orgânica está associado à melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, promovendo maior fertilidade e beneficiando as comunidades que dependem desses recursos.

Conforme destacado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2021), a manutenção dos estoques de carbono no solo é essencial para a sustentabilidade dos sistemas produtivos. Do mesmo modo, sistemas internacionais de classificação de solos, como a WRB (World Reference Base for Soil Resources), reconhecem o carbono orgânico como um dos principais indicadores da qualidade e funcionalidade do solo.

O elevado teor de carbono na camada superior reforça a importância dos solos antrópicos como reservatórios de carbono, contribuindo diretamente para o sequestro de carbono atmosférico. Nesse contexto, tais solos assumem papel estratégico na mitigação das mudanças climáticas, ao atuarem como sumidouros de CO_2, além de promoverem melhorias na fertilidade e na qualidade do solo, impactando positivamente a qualidade de vida das comunidades locais.

Dessa forma, os resultados indicam que o solo analisado apresenta boa disponibilidade de nutrientes e elevado teor de matéria orgânica, suas características estar associadas à presença de solos antropogênicos, como as Terras Pretas de Índio. Esses solos são reconhecidos por sua alta fertilidade e pela capacidade de armazenar carbono por longos períodos, sendo considerados importantes modelos de manejo sustentável do solo, diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas (Lehmann *et al.*, 2003; Glaser; Woods, 2004).

Conclusão

Conclui-se que os solos antrópicos são fundamentais para mitigar as mudanças climáticas, pois além de ser patrimônio natural nacional do setor arqueológico na APA Araguaia. Destaca-se por possuir uma exacerbada relevância ambiental por conter um grande reservatório de carbono o que garante o equilíbrio ecológico mantendo a conservação da APA Araguaia.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 19 jul. 2000.

COSTA, A. R. et al. Dinâmica do fósforo no solo e sua importância para as plantas. *Revista de Ciências Agrárias*, [S.l.], 2024.

CRESWELL, J. W. *Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto*. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Solos e serviços ecossistêmicos: carbono no solo*. Brasília, DF: Embrapa, 2021.

GLASER, B.; WOODS, W. I. *Amazonian Dark Earths: explorations in space and time*. Berlin: Springer, 2004.

GROKALISKI, L. *Sítios arqueológicos e formação de Terra Preta no Araguaia*. 2025. Relatório técnico.

HILBERT, L. *Arqueologia da Terra Preta na Amazônia Oriental*. 2025. Material técnico-científico.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Cidades e estados: São Geraldo do Araguaia*. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. *Dados climáticos do Brasil*. Brasília, DF: INMET, 2022.

KERN, D. C. *Terra Preta de Índio: sua origem e importância para a Amazônia*. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2003.

KERN, D. C. et al. Amazonian Dark Earths: new insights and perspectives. *Frontiers in Environmental Science*, v. 9, 2021.

LEHMANN, J. et al. *Amazonian Dark Earths: origin, properties and management*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. 2. ed. London: Routledge, 2021.

MELO, V. F. et al. Fertilidade do solo e nutrição de plantas. *Revista Brasileira de Agroecologia*, [S.l.], 2023.

MINAYO, M. C. S. *O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde*. 14. ed. São Paulo: Hucitec, 2014.

RAIJ, B. van. *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. Piracicaba: IPNI, 2011.

SCHMIDT, M. J. et al. Dark earths and the human-built Amazonian landscapes. *Quaternary International*, v. 560–561, p. 3–19, 2021.

SILVA, F. C.; MENDES, I. C.; RAMOS, M. L. G. Propriedades químicas de solos antrópicos na Amazônia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 45, e0210001, 2021.

ANÁLISE PRELIMINAR DA ESTABILIDADE DO LEITO EM UM RIO DE ENCOSTA APÓS PRECIPITAÇÃO EXTREMA

Gabriel Sulzbach Pereira, Daniel Gustavo Allasia Piccilli, Vanessa Sari, Eliane Fischborn, Camila Caballero Cristaldo, Rodrigo Girardon Della Pace, Limber Zenteno Aguilera e Francisco Paim de Freitas Neto
Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: gabrielpereirars@gmail.com.

Palavras-chave: Precipitação Extrema; Estabilidade; Rios de Encosta.

Resumo

Entre abril e maio de 2024, o Rio Grande do Sul foi atingido por um evento hidrológico extremo de magnitude excepcional, com acumulados pluviométricos superiores a 700 mm em poucos dias, inundações generalizadas e milhares de movimentos de massa. Nas porções declivosas do Rebordo do Planalto Meridional, os impactos foram ainda mais expressivos, evidenciando a vulnerabilidade de rios de encosta submetidos a eventos de alta magnitude. Nesses sistemas, a precipitação extrema pode comprometer a estabilidade do canal, desencadeando alterações morfológicas como alargamento da seção, rebaixamento do leito e reorganização das formas fluviais, com reflexos sobre a mobilização sedimentar. Apesar da relevância desse processo, ainda são escassos os estudos que avaliam a resposta de índices de estabilidade em rios de encosta do Rebordo do Planalto Meridional afetados por precipitação extrema. Nesse contexto, este estudo preliminar investigou a resposta hidromorfológica de um rio de encosta na bacia do arroio Rancho do Amaral, no Rio Grande do Sul, em um trecho com morfologia *step-pool*, a partir da comparação entre condições pré e pós-evento extremo de abril e maio de 2024. A análise foi conduzida por meio da aplicação dos índices *Relative Bed Stability* (RBS) e *Roughness-corrected Relative Bed Stability* (RBS*), com base em levantamentos hidromorfológicos e granulométricos obtidos em condições pré e pós-evento. Para esta etapa, foram consideradas seis unidades *step-pool*, sendo três na condição pré-evento e três na condição pós-evento. Os resultados preliminares sugerem redução da estabilidade relativa do leito após a cheia excepcional, com diminuição da média do RBS de 2,197 para 0,940 e do RBS* de 4,735 para 1,018. Na condição pré-evento, todas as unidades apresentaram valores superiores a 1 para ambos os índices, condição associada a maior estabilidade relativa do leito, enquanto, após o evento, observou-se aumento do número de unidades com valores inferiores a esse limiar, indicando maior suscetibilidade à mobilização sedimentar. O contraste mais acentuado observado no RBS* sugere maior sensibilidade desse índice às alterações na rugosidade de forma e na organização estrutural do leito. Embora a análise tenha caráter preliminar e deva ser interpretada com cautela, os resultados reforçam o potencial desses índices para o diagnóstico hidromorfológico da estabilidade em rios de encosta submetidos a eventos de alta magnitude em ambientes subtropicais de alta energia.

Introdução

Entre abril e maio de 2024, o Rio Grande do Sul foi atingido por um evento hidrológico extremo de magnitude excepcional, amplamente reconhecido entre os mais severos já registrados no Brasil. Em poucos dias, os acumulados pluviométricos ultrapassaram 700 mm, desencadeando inundações generalizadas e milhares de movimentos de massa (INMET, 2024; COLLISCHONN et al., 2025). Nas porções declivosas do Rebordo do Planalto Meridional, os impactos foram ainda mais expressivos, com registro do maior episódio de instabilidade de encostas documentado no país (CEMADEN, 2024; ANDRADES FILHO et al., 2024).

Em rios de encosta, a precipitação extrema pode comprometer a estabilidade do canal. Cheias dessa magnitude podem desencadear mudanças morfológicas, como alargamento da seção, rebaixamento do leito e rearranjo das formas fluviais, com efeitos sobre a estabilidade morfológica, o transporte de sedimentos e a suscetibilidade à instabilidade de margens e encostas (MOLNAR et al., 2010; PELLEGRINI et al., 2021; TUROWSKI et al., 2009). Em trechos com morfologia *step-pool* (degrau-poço), predominante em ambientes declivosos, essas alterações tornam-se particularmente importantes, uma vez que esse arranjo morfológico exerce papel central na dissipação de energia, na estabilidade hidráulica e na organização estrutural do leito, influenciando a resposta do canal a eventos de alta magnitude (CHURCH; ZIMMERMANN, 2007; WILCOX et al., 2011).

A estabilidade de rios de encosta é um componente essencial da dinâmica fluvial em contextos marcados por elevada variabilidade hidrológica e intensificação das pressões antrópicas. Nesses sistemas, a análise dos efeitos da precipitação extrema permite reconhecer fases críticas de ajuste hidromorfológico e compreender os processos de reorganização e recuperação do canal após o distúrbio (MOLNAR et al., 2010; PELLEGRINI et al., 2021; TUROWSKI et al., 2009). Entretanto, sua avaliação permanece desafiadora em ambientes declivosos, onde a combinação entre escoamentos de alta energia, heterogeneidade das formas de leito, respostas morfológicas rápidas e restrições de acesso em campo dificulta a obtenção do monitoramento hidromorfológico contínuo (KAUFMANN et al., 1999; KAUFMANN et al., 2008).

Nesse contexto, índices de estabilidade têm sido empregados na avaliação de rios de encosta, especialmente em ambientes com monitoramento restrito. Ao sintetizarem atributos físicos do canal em métricas derivadas de levantamentos padronizados, esses indicadores permitem comparar a condição do leito e das margens e apoiar o diagnóstico hidromorfológico (SULAIMAN et al., 2021). Entre os índices aplicados à estabilidade do leito, destacam-se o Relative Bed Stability (RBS) e sua versão corrigida pela rugosidade, o RBS*. O RBS relaciona a granulometria do leito à competência hidráulica do canal, enquanto o RBS* incorpora o efeito da rugosidade de forma por meio da partição da tensão de cisalhamento, refinando a estimativa da estabilidade em rios de

encosta submetidos à precipitação extrema (KAUFMANN et al., 1999; KAUFMANN et al., 2008). Embora esses índices sejam amplamente utilizados, ainda são escassos os estudos que examinam sua resposta em canais fluviais do Rebordo do Planalto Meridional afetados por eventos de alta magnitude. Essa lacuna limita a avaliação de sua aplicabilidade e sensibilidade em condições de alta energia e rápida reorganização morfológica, reduzindo seu potencial como ferramenta de diagnóstico da estabilidade do canal.

Diante desse cenário, este estudo preliminar investigou a resposta hidromorfológica de um rio de encosta no Rebordo do Planalto Meridional por meio da comparação entre condições pré e pós-evento extremo de abril e maio de 2024. A investigação foi conduzida na bacia do arroio Rancho do Amaral, no Rio Grande do Sul, em um trecho com morfologia *step-pool* representativo desse compartimento geomorfológico. Para isso, foram aplicados os índices RBS e RBS* com base em levantamentos hidromorfológicos e granulométricos obtidos antes e após o evento, de modo a reconhecer indícios de alteração na estabilidade do leito e de reorganização morfológica associadas ao distúrbio. Os resultados podem contribuir para a compreensão inicial da resposta desses sistemas frente a eventos hidrológicos extremos em ambientes subtropicais de alta energia, além de evidenciar o potencial desses índices como ferramenta de apoio ao diagnóstico hidromorfológico.

Material e Métodos

Área de Estudo

A área de estudo corresponde à bacia do arroio Rancho do Amaral, afluente do rio Vacacaí-Mirim, situada entre os municípios de Santa Maria e Itaara, no Rio Grande do Sul, com área de drenagem aproximada de 4,45 km². Inserida no Rebordo do Planalto Meridional, a bacia apresenta relevo declivoso, com altitudes entre aproximadamente 200 e 500 m, canais de alta declividade e encostas frequentemente superiores a 30%, condições que favorecem a ocorrência de morfologia *step-pool*. Do ponto de vista geológico, a área localiza-se na transição entre derrames vulcânicos da Formação Serra Geral e unidades sedimentares, com ocorrência de basaltos, arenitos e depósitos coluviais (CPRM, 2006; MACIEL FILHO, 1990). O clima regional é subtropical úmido (Cfa), com precipitação média anual entre 1900 e 2100 mm distribuída ao longo do ano (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007; INMET, 2024). Os solos predominantes são Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (54%) e Neossolo Regolítico Húmico léptico (46%) (EMBRAPA, 2006), enquanto o uso e cobertura do solo são dominados por vegetação nativa (47,4%) e áreas agropecuárias (35,4%) (MAPBIOMAS, 2024). Para a análise detalhada, foi selecionado um trecho de aproximadamente 480 m próximo ao exutório, com sedimentos predominantemente grossos e unidades *step-pool* bem desenvolvidas, permitindo a comparação entre as condições pré e pós-evento.

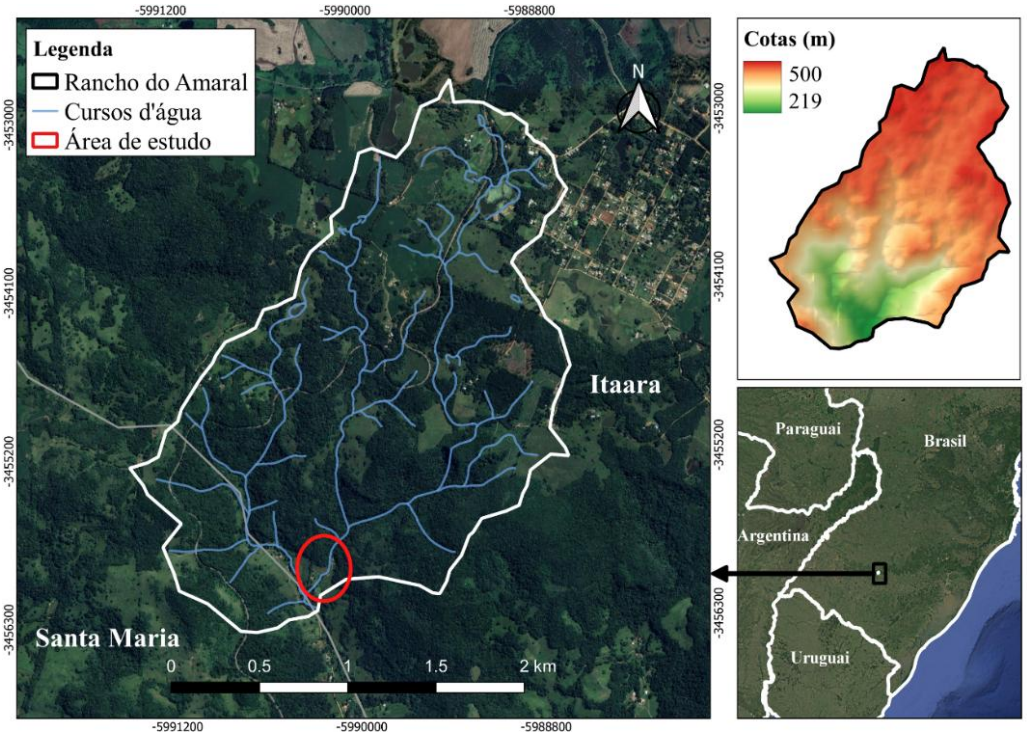


Figura 01: Localização e variação altimétrica da bacia do Rancho do Amaral.
Fonte: Pereira (2024).

De acordo com a estação do INMET localizada a cerca de 17 km da bacia do arroio Rancho do Amaral, o evento de abril-maio de 2024 registrou acumulado de aproximadamente 500 mm em cinco dias. Esse valor corresponde a cerca de 25% da média histórica anual regional, estimada entre 1900 e 2100 mm (INMET, 2024). Tal magnitude caracteriza uma condição hidrometeorológica excepcional no entorno da área de estudo e fornece o contexto para a interpretação das alterações hidromorfológicas observadas no trecho *step-pool* monitorado.

Levantamento dos parâmetros hidromorfológicos

O levantamento hidromorfológico foi realizado em trechos com morfologia *step-pool* bem desenvolvida, identificados em campo por inspeção visual, considerando a presença de degraus formados por sedimentos grossos intercalados por poços, conforme critérios descritos na literatura. As unidades analisadas pertencem a sequências com, no mínimo, três unidades consecutivas, de modo a padronizar as seções avaliadas. As medições topográficas foram obtidas com estação total, trena e mira topográfica, registrando-se, em cada unidade, pontos representativos do perfil longitudinal, como o final a jusante do poço, o ponto de maior profundidade, a base e o topo do degrau e a transição a montante. Esses dados permitiram caracterizar a geometria das unidades e obter variáveis hidromorfológicas necessárias à análise da estabilidade do canal.

A partir dos levantamentos de campo, foram obtidas variáveis como largura do canal, comprimento das unidades, profundidade residual, declividade do leito, altura dos degraus e diâmetro característico dos sedimentos estruturais, utilizadas no cálculo dos índices RBS e RBS*. Para esta análise preliminar, foram considerados os levantamentos realizados em dezembro de 2023, representando a condição pré-evento, e em julho de 2024, representando a condição pós-evento extremo. Ao todo, foram analisadas seis unidades *step-pool*, sendo três na condição pré-evento e três na condição pós-evento.

O estudo adotou, portanto, um desenho observacional pré-pós de oportunidade, viabilizado pela existência de levantamento hidromorfológico anterior ao evento extremo de abril-maio de 2024. Como a cheia promoveu reorganização morfológica no trecho monitorado, não foi possível estabelecer pareamento estrito entre unidades pré e pós-evento. Assim, a comparação foi conduzida no nível do trecho, interpretando as unidades analisadas como expressões morfológicas representativas das condições anteriores e posteriores ao distúrbio. A Figura 02 apresenta a metodologia adotada no estudo:

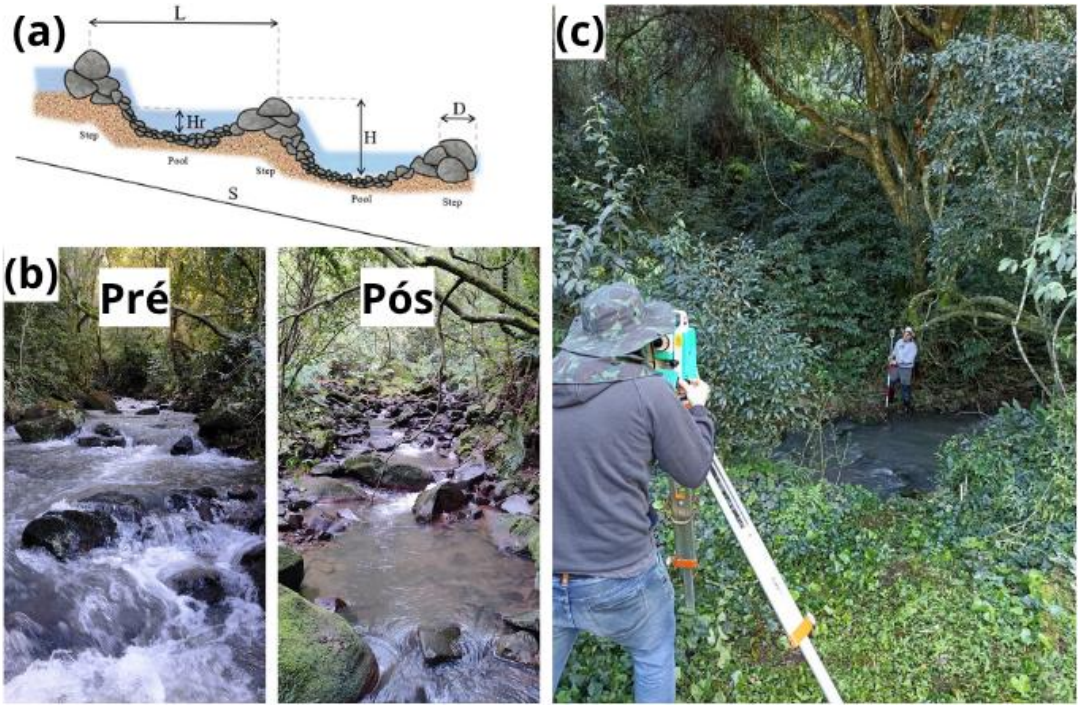


Figura 02: Metodologia adotada no estudo: (a) esquema da morfologia step-pool; (b) unidades analisadas em condições pré e pós-evento; (c) levantamento topográfico no trecho monitorado.
Fonte: Autor.

Aplicação e análise dos índices de estabilidade RBS e RBS*

A estabilidade do leito foi analisada por meio dos índices RBS e RBS* (KAUFMANN et al., 1999, 2008), empregados neste estudo como métricas comparativas da condição hidromorfológica do trecho monitorado nas situações pré e pós-evento. O RBS (Equação 01) expressa a relação entre a granulometria dos sedimentos estruturais do leito e o diâmetro crítico de mobilização em condição de margem plena, enquanto o RBS* (Equação 02) incorpora o efeito da rugosidade de forma, refinando a estimativa da estabilidade em trechos com morfologia *step-pool*. Em ambos os casos, valores superiores a 1 indicam maior estabilidade relativa do leito, e valores inferiores a 1 sugerem maior suscetibilidade à mobilização sedimentar.

$$RBS = \frac{D_{gm}}{D_{cbf}}, D_{cbf} = \frac{0{,}604 R_{bf} S}{\theta} \qquad (01)$$

$$RBS* = \frac{1.66 \theta D_{gm}}{(R^{*}_{bf} (\frac{C_P}{C_t})^{\frac{1}{3}} S)} \qquad (02)$$

Onde: *Dgm* é o diâmetro característico do material do leito, *Dcbf* é o diâmetro crítico, *Rbf* é o raio hidráulico de margem plena, *S* é a inclinação de energia, θ é a tensão crítica adimensional (padrão 0,044), *Rbf** é o raio hidráulico efetivo em condição de banco-cheio, *Cp* é o coeficiente de resistência hidráulica associado aos grãos do leito e *Ct* é o coeficiente de resistência hidráulica total do trecho.

Neste estudo preliminar, os índices foram utilizados com finalidade descritiva e comparativa, buscando reconhecer indícios de alteração na estabilidade relativa do leito entre as condições pré e pós-evento no trecho monitorado. Assim, sua interpretação foi conduzida no nível do trecho, considerando as unidades analisadas como expressões morfológicas representativas das condições observadas antes e depois do distúrbio, sem pressupor pareamento estrito entre elas.

Resultados e Discussão

A Tabela 01 apresenta os valores das principais variáveis hidromorfológicas e dos índices de estabilidade obtidos para as unidades analisadas em condições pré e pós-evento.

Condição	Unidade	Dgm (m)	Rbf (m)	S (m/m)	Dcbf (m)	Cp	Ct	RBS	RBS*
Pré-evento	SPD1	0,61	0,33	0,06	0,27	0,07	0,97	2,26	5,48
Pré-evento	SPD2	0,70	0,39	0,08	0,43	0,09	0,27	1,60	2,36
Pré-evento	SPD3	0,56	0,28	0,05	0,20	0,06	0,74	2,73	6,37
Pós-evento	SPD4	0,55	0,36	0,09	0,43	0,13	0,24	1,28	1,57
Pós-evento	SPD5	0,62	0,41	0,13	0,70	0,14	0,16	0,89	0,93
Pós-evento	SPD6	0,58	0,41	0,16	0,89	0,25	0,15	0,65	0,56

Tabela 01: Valores das principais variáveis hidromorfológicas e dos índices de estabilidade obtidos.
Fonte: Autor.

Os resultados preliminares do índice RBS sugerem redução da estabilidade relativa do leito após o evento extremo (Figura 03). A média das três unidades analisadas diminuiu de 2,197 na condição pré-evento para 0,940 (redução de aproximadamente 57%) na condição pós-evento. Na condição pré-evento, as três unidades apresentaram valores superiores a 1, enquanto, na condição pós-evento, apenas uma permaneceu acima desse limiar e duas passaram a registrar valores inferiores a 1, indicando maior suscetibilidade à mobilização sedimentar.

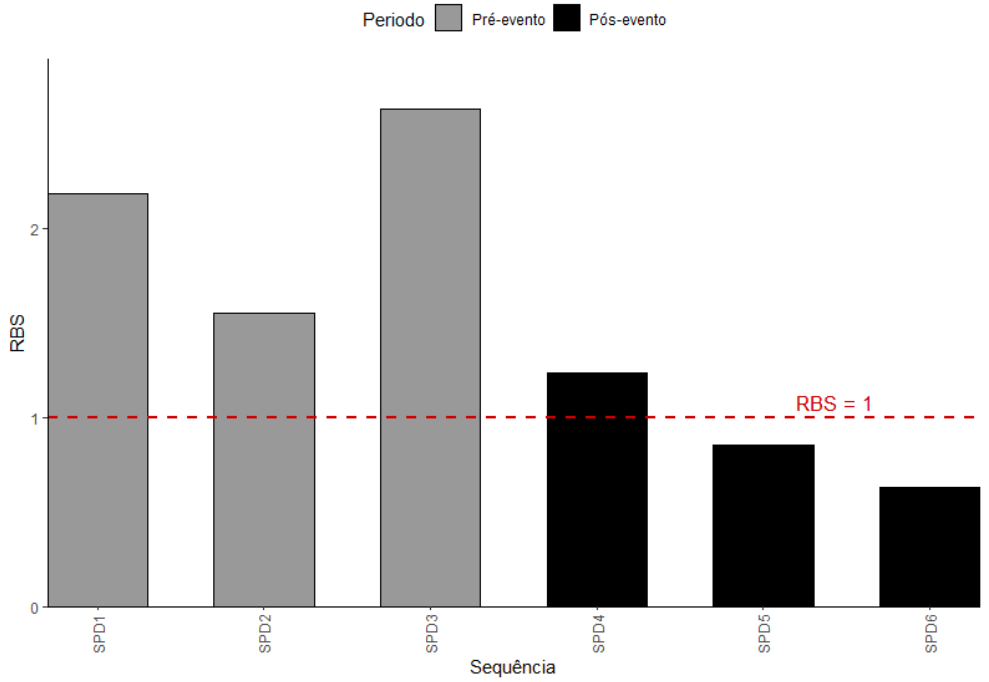


Figura 03: Resultados preliminares do índice RBS nas unidades analisadas, em condições pré e pós-evento.
Fonte: Autor.

Os resultados preliminares do índice RBS* evidenciaram de forma mais expressiva indícios de redução da estabilidade do leito após o evento extremo (Figura 04). A média das três unidades analisadas diminuiu de 4,735 na condição pré-evento para 1,018 (redução de aproximadamente 78%) na condição pós-evento, sugerindo contraste mais acentuado do que o observado para o RBS. Antes do evento, as três unidades apresentaram valores superiores a 1; após o evento, duas passaram a registrar valores inferiores a esse limiar. Esse comportamento sugere maior sensibilidade do RBS* às alterações morfológicas do canal, especialmente àquelas associadas à rugosidade de forma e à reorganização do leito

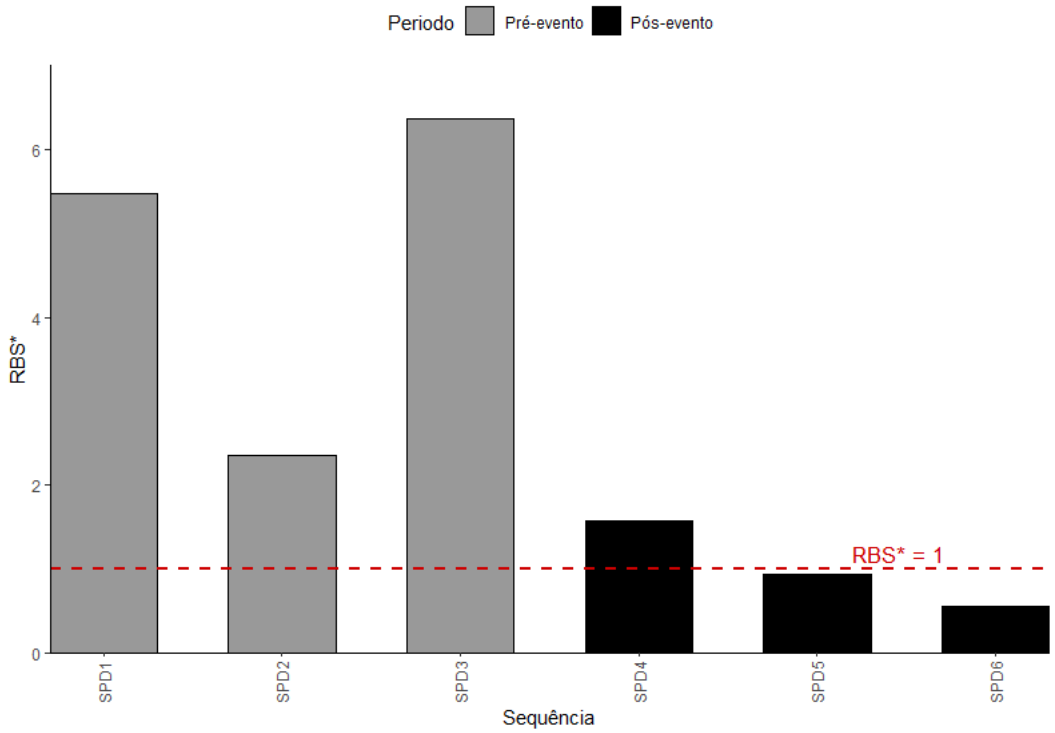


Figura 04: Resultados preliminares do índice RBS* nas unidades analisadas, em condições pré e pós-evento
Fonte: Autor.

De modo geral, a queda conjunta dos índices sugere redução da estabilidade do leito nas unidades analisadas, associada à precipitação extrema de abril e maio de 2024. Esse padrão é compatível com processos de reorganização morfológica documentados em eventos de alta magnitude em rios de encosta, com reflexos sobre a resistência do canal à mobilização sedimentar (MOLNAR et al., 2010; TUROWSKI et al., 2009; PELLEGRINI et al., 2021). O contraste mais acentuado observado no RBS* sugere que as alterações associadas ao evento não se restringiram à relação entre granulometria e competência hidráulica, mas também envolveram mudanças na rugosidade de forma e na organização estrutural do leito, aspecto particularmente relevante em trechos com morfologia *step-pool* (CHURCH; ZIMMERMANN, 2007; WILCOX et al., 2011; KAUFMANN et al., 2008). Além disso, a permanência de uma unidade com valor superior a 1 na condição pós-evento indica que a resposta do canal não foi uniforme ao longo do trecho analisado, sugerindo a influência de controles locais na reorganização morfológica após a cheia extrema.

Os resultados também reforçam a aplicabilidade de índices sintéticos em uma avaliação observacional da estabilidade hidromorfológica. Em consonância com Sulaiman et al. (2021), que destacam o uso de indicadores integrados no diagnóstico de sistemas fluviais montanhosos, a resposta observada para o RBS e o RBS* sugere potencial para reconhecer setores mais suscetíveis ao ajuste do leito e à mobilização sedimentar, além de apoiar o acompanhamento da estabilidade em rios de encosta submetidos a eventos extremos. Nesse sentido, os resultados acrescentam uma evidência hidromorfológica local aos impactos já documentados para esse evento extremo no Rio Grande do Sul (COLLISCHONN et al., 2025).

A principal limitação do estudo preliminar é o número reduzido de unidades monitoradas e a impossibilidade de pareamento estrito entre unidades pré e pós-evento, uma vez que a cheia extrema reorganizou a morfologia do trecho. No entanto, essa limitação é inerente ao próprio processo investigado, pois eventos de alta magnitude em canais *step-pool* podem destruir, fundir ou deslocar unidades morfológicas, tornando inviável o acompanhamento pareado convencional. Assim, a comparação foi conduzida como um desenho observacional pré-pós de oportunidade, no nível do trecho, interpretando as unidades como expressões morfológicas representativas das condições pré e pós-evento. Mesmo com a necessidade de interpretar os resultados com cautela, o comportamento consistente dos índices evidencia seu potencial para o diagnóstico rápido da estabilidade em rios de encosta.

Considerações Finais

Os resultados preliminares sugerem que a precipitação extrema de abril e maio de 2024 esteve associada à redução da estabilidade do leito no trecho analisado do rio de encosta no Rebordo do Planalto Meridional. Os índices RBS e RBS* mostraram-se sensíveis às diferenças entre as condições pré e pós-evento, com destaque para o RBS*, que evidenciou de forma mais expressiva as alterações associadas à reorganização estrutural do leito em trechos com morfologia *step-pool*. Em conjunto, os resultados sugerem aumento da suscetibilidade à mobilização sedimentar após o evento extremo e reforçam o potencial desses índices como ferramentas de diagnóstico hidromorfológico da estabilidade em rios de encosta. Embora a análise tenha caráter preliminar e deva ser interpretada com cautela, o estudo contribui para a documentação de uma resposta hidromorfológica observada antes e depois de um distúrbio excepcional, oferecendo subsídios para o monitoramento da evolução do canal após eventos de alta magnitude.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e o grupo de pesquisa ECOTECNOLOGIAS. Agradece-se, ainda, ao Grupo Bandeirantes da Serra (GBS) pela disponibilização da sede e pelo suporte logístico às atividades de campo.

Referências Bibliográficas

ANDRADES FILHO, C. O. et al. Nota Técnica Conjunta IGEO/CEPSRM - 06/2024: mapeamento das cicatrizes de movimentos de massa decorrentes do acumulado de chuva no RS entre 27/04 e 13/05 de 2024. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2024.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). Nota técnica nº 412/2024/SEI-CEMADEN: mapeamento dos movimentos de massa relacionados ao desastre de abril-maio de 2024 no estado do Rio Grande do Sul. São José dos Campos: CEMADEN/MCTI, 2024.

CHURCH, M.; ZIMMERMANN, A. Form and stability of step-pool channels: research progress. Water Resources Research, v. 43, n. 3, p. W03415, 2007. DOI: 10.1029/2006WR005037.

COLLISCHONN, W. et al. The exceptional hydrological disaster of April-May 2024 in southern Brazil. RBRH, v. 30, p. e1, 2025. DOI: 10.1590/2318-0331.302520240119.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Brasília, DF: CPRM, 2006. EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Precipitação acumulada. Brasília, DF: INMET, 2024. Disponível em: portal institucional do INMET. Acesso em: 10 maio 2024.

KAUFMANN, P. R. et al. Quantifying physical habitat in wadeable streams. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1999. EPA/620/R-99/003.

KAUFMANN, P. R. et al. A roughness-corrected index of relative bed stability for regional stream surveys. Geomorphology, v. 99, n. 1-4, p. 150-170, 2008. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.10.007.

MACIEL FILHO, C. L. Geologia da Folha Santa Maria (RS/SC). Boletim de Geociências do Serviço Geológico do Brasil, v. 5, p. 25-42, 1990.

MOLNAR, P. et al. Analysis of changes in the step-pool morphology and channel profile of a steep mountain stream following a large flood. Geomorphology, v. 124, n. 1-2, p. 85-94, 2010. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.08.014.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology and Earth System Sciences, v. 11, n. 5, p. 1633-1644, 2007.

PELLEGRINI, G. et al. The morphological evolution of a step-pool stream after an exceptional flood and subsequent ordinary flow conditions. Water, v. 13, n. 24, p. 3630, 2021. DOI: 10.3390/w13243630.

PEREIRA, G. S. Caracterização dos processos hidromorfológicos em uma região de variação abrupta de relevo. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2024.

PROJETO MAPBIOMAS. Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso do Solo do Brasil. 2024. Disponível em: portal institucional do MapBiomas. Acesso em: 10 maio 2024.

SULAIMAN, M. S. et al. Development of river morphologic stability index (RMSI) to assess mountain river systems. Journal of Hydrology: Regional Studies, v. 37, p. 100918, 2021. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100918.

TUROWSKI, J. M. et al. The impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel. Earth Surface Processes and Landforms, v. 34, n. 12, p. 1661-1673, 2009. DOI: 10.1002/esp.1855.

WILCOX, A. C. et al. Hydraulics, morphology, and energy dissipation in an alpine step-pool channel. Water Resources Research, v. 47, n. 7, p. W07514, 2011. DOI: 10.1029/2010WR010192.

ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E EVENTOS EXTREMOS ASSOCIADOS AOS IMPACTOS NA SAÚDE ÚNICA

1 Thayse Amanda Farias Cabral, 2 Rebeca de Lima Oliveira, 3 Ana Virgínia Marinho Silveira
1 Universidade Federa Rural de Pernambuco, e-mail: thayse.cabral@ufrpe.br; 2 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: rebeca.limaoliveira@ufrpe.br; 3 Universidade Federa Rural de Pernambuco, e-mail: marinho_av@hotmail.com

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Eventos extremos; Saúde Única.

Resumo

As mudanças climáticas têm intensificado a ocorrência de eventos extremos, gerando impactos significativos sobre os ecossistemas e a saúde humana e animal, além de favorecer a disseminação de doenças infecciosas, sendo a abordagem da Saúde Única fundamental para a compreensão integrada desses efeitos. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica das mudanças climáticas e eventos extremos e seus impactos na Saúde Única no Brasil. A pesquisa foi conduzida na base de dados *Web of Science*, via Portal de Periódicos *CapesCafe*, resultando na identificação de 100 documentos, dos quais 78 foram selecionados após critérios de elegibilidade. Os dados foram analisados por meio do software VOSviewer, permitindo a construção de redes de coautoria, citações e coocorrência de palavras-chave. Os resultados evidenciaram crescimento significativo das publicações a partir de 2016, com destaque para a liderança dos Estados Unidos em produção científica e número de citações, seguidos por Reino Unido e Suécia. A análise de palavras-chave revelou a predominância de termos como “climate change”, “temperature”, “malaria”, “transmission” e “vector-borne diseases”, indicando forte associação entre variáveis climáticas e a dinâmica de doenças infecciosas. Além disso, a presença de estudos altamente citados, como Altizer *et al.* (2013) e Lafferty *et al*. (2009), reforça a base teórica consolidada do campo. Dessa forma, os resultados evidenciam um campo científico interdisciplinar, em expansão e de elevada relevância, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias integradas de mitigação e adaptação no contexto da Saúde Única.

Introdução

No cenário contemporâneo, a crise climática representa uma das maiores ameaças à saúde do mundo no século XXI, impactando diretamente os aspectos ambientais, sociais e econômicos relacionados ao bem-estar. O aumento da temperatura média global, combinado com as mudanças drásticas nos padrões de chuva, tem intensificado a frequência e a força dos eventos extremos, como ondas de calor, secas, inundações e tempestades fortes. Esses fenômenos afetam os ecossistemas naturais, comprometem a segurança hídrica e alimentar e favorecem o surgimento e propagação de doenças infecciosas, especialmente nas áreas mais vulneráveis social e ambientalmente (Zhang *et al*., 2022; Eyzaguirre *et al*., 2025). As mudanças ambientais ligadas ao clima também alteram o comportamento dos vetores e dos patógenos, aumentando os riscos à saúde humana e animal.

Os eventos climáticos extremos têm sido relacionados diretamente ao aumento da ocorrência de doenças infecciosas e zoonóticas, sobretudo nas áreas onde o saneamento é limitado. As inundações, tempestades e outros desastres naturais podem comprometer o abastecimento de água, o saneamento e a gestão de resíduos, criando condições propícias para a disseminação de doenças de veiculação hídrica, arboviroses e infecções respiratórias. Além disso, o deslocamento de populações, a perda de habitats e as alterações nos ecossistemas contribuem para um maior contato entre humanos, animais domésticos e silvestre, favorecendo a surgimento de patógenos e ampliando riscos epidemiológicos após eventos extremos (Winkler *et al*., 2025; Eyzaguirre *et al*., 2025).

Neste contexto, a abordagem da Saúde Única tem sido amplamente empregada para entender a ligação entre a saúde humana, animal e ambiental diante das mudanças climáticas. Essa perspectiva integrada deixa claro que a degradação do meio ambiente, a perda de biodiversidade, a urbanização e os eventos extremos aumentam o risco de surgimento e disseminação de zoonoses. A aplicação da abordagem Saúde Única possibilita integrar a vigilância epidemiológica, o monitoramento ambiental e a saúde animal, além de fortalecer estratégias de prevenção e de resposta aos riscos associados às mudanças climáticas e seus impactos na saúde mundial (Zhang *et al*., 2022; Winkler *et al*., 2025).

No Brasil, a situação se torna ainda mais relevante devido à grande biodiversidade, à rápida urbanização, às mudanças no uso do solo e da frequente ocorrência de eventos extremos, como secas prolongadas, inundações e ondas de calor. Esses fatores ampliam a vulnerabilidade sócia e ambiental e favorecem a ocorrência de doenças transmitidas por vetores e zoonoses, especialmente em regiões com desigualdades estruturais. Além disso, a intensificação de desastres naturais pode provocar interrupções nos serviços de saneamento e saúde, elevando o risco de surtos epidêmicos e agravando impactos na saúde humana, animal e ambiental (Soeiro-Barbosa *et al*., 2025).

Mediante ao exposto, entender como a literatura científica tem abordado a relação entre mudanças climáticas, eventos extremos e seus impactos na Saúde Única se torna essencial para criar estratégias de mitigação e adaptação. Assim, o presente estudo tem como objetivo realizar uma análise bibliométrica das mudanças climáticas e eventos extremos e seus impactos na Saúde Única no Brasil, buscando identificar tendências de pesquisa, principais áreas temáticas, redes de colaboração científica e a evolução do conhecimento sobre o tema.

Material e Métodos

Levantamento Bibliográfico e Bibliométrico

Diante do tema abordado pelo estudo, foi realizado um levantamento bibliométrico baseado na coleta e análise de publicações científicas. A busca foi finalizada no dia 28 de março de 2026, encontrando artigos internacionais e nacionais, através da plataforma Portal periódicos da *CapesCafe.* Optou-se pela base de dados *Web of Science*, pois, em comparação a outras plataformas de acesso, forneceu os resultados mais relevantes e que se enquadram na temática sobre mudanças climáticas e eventos extremos e seus impactos na Saúde Única. A Figura 01 mostra o processo das etapas e como foram selecionados os documentos.

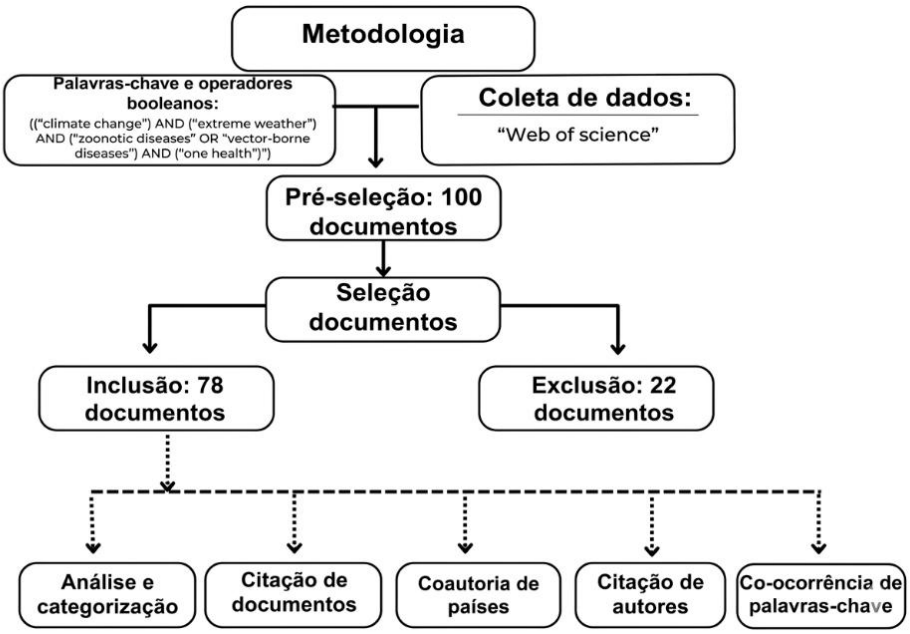


Figura 01: Fluxo metodológico da revisão sistemática.
Fonte: As autoras (2026)

Ao realizar a pesquisa, foram utilizadas as palavras-chave e operadores booleanos para refinar e direcionar os termos de pesquisa. Dessa forma, no processo da busca pela temática, na base de dados do *Web of science*, foram empregados os operadores booleanos na seguinte combinação: *("climate change") AND ("extreme weather") AND ("zoonotic diseases" OR "vector-borne diseases") AND ("one health OR planetary health")*. Como resultado, foram identificados 100 documentos relacionados ao tema, demonstrando o crescente interesse da comunidade científica sobre este novo tema. Dentre os 100 documentos analisados, foram selecionados aqueles que melhor se enquadraram no tema, após a leitura dos resumos. Este procedimento resultou na identificação de 78 documentos e a exclusão de 22. Após a seleção, os documentos foram exportados no formato de arquivo *TXT*, permitindo a manipulação e organização dos dados para as próximas etapas da análise. Posteriormente, o arquivo (*.TXT)* foi importado para o software *VOSviewer*, o que possibilitou a visualização e análise de redes de coautoria, bem como de citações entre documentos, países e autores, além da coocorrência de palavras-chave.

Resultados e Discussão

Análise e Categorização da Produção Científica

A análise temporal das publicações evidenciou uma evolução gradual ao longo do período de 2005 a 2025, com baixa representatividade inicial e crescimento progressivo nos anos posteriores. Entre 2005 e 2014, observou-se uma produção reduzida, com valores anuais variando entre 0% e 3,85% do total, destacando-se 2010 e 2015 com 3,85% cada. A partir de 2016, verificou-se um aumento mais consistente, com 5,13% em 2016 e 2017, seguido por um salto em 2018 (8,97%) e manutenção de níveis elevados em 2019 (7,69%) e 2020 (8,97%). Esse comportamento indicou um crescente interesse científico na temática, associado à ampliação do debate sobre mudanças climáticas e saúde em diferentes áreas do conhecimento, evidenciando a consolidação de um campo interdisciplinar em expansão (Zhang *et al*., 2022), conforme ilustrado na Figura 02.

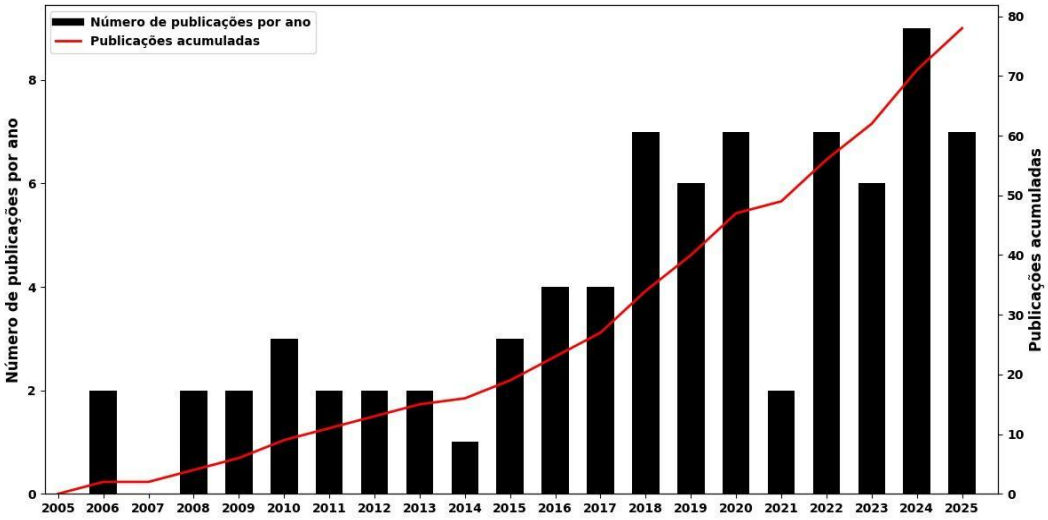


Figura 02: Gráfico da evolução temporal do número de publicações científicas sobre mudanças climáticas e eventos extremos e seus impactos na saúde única, no período de 2005 a 2025.
Fonte: As autoras (2026)

Nos anos mais recentes, a produção apresentou maior expressividade e consolidação do tema na literatura científica. Em 2022, registrou-se 8,97% das publicações, seguido por 7,69% em 2023, culminando no maior percentual em 2024 (11,54%), o que representou o pico da série histórica analisada. Em 2025, o percentual manteve-se elevado (8,97%), reforçando a continuidade do interesse acadêmico. Em contraste, anos como 2005 e 2007 não apresentaram registros (0%), evidenciando lacunas iniciais na produção científica. Esses resultados demonstraram uma tendência clara de crescimento ao longo do tempo, com maior concentração de estudos na última década.

Análise das citações de documentos

O resultado da análise de 78 documentos, como mostra a figura 03, mostra um grande interesse da comunidade acadêmica acerca do tema. Os estudos publicados no período de 2006 à 2025 evidenciaram a consolidação e amadurecimento nas pesquisas nessa área, destacando a importância estratégica e de posição fundamental no cenário global. A rede bibliométrica (Figura 03), formada por 7 *clusters* principais, revela uma estrutura intelectual organizada em sete frentes distintas, onde o papel de cada *cluster* é definido pela sua centralidade ou especialização temática. Os *clusters* centrais, como o amarelo e o rosa, atuam como os pilares fundacionais da rede; eles representam os trabalhos "clássicos" ou de revisão que estabelecem a base teórica comum para os demais pesquisadores, servindo de ponte para conectar diferentes subáreas do conhecimento. Por sua vez, o *cluster* marrom e o roxo assumem uma posição de integração, funcionando como mediadores que sintetizam conceitos consolidados com abordagens mais atuais, promovendo a atualização teórica e aplicação desses conhecimentos em contextos contemporâneos, especialmente no tema referente às mudanças climáticas e saúde.

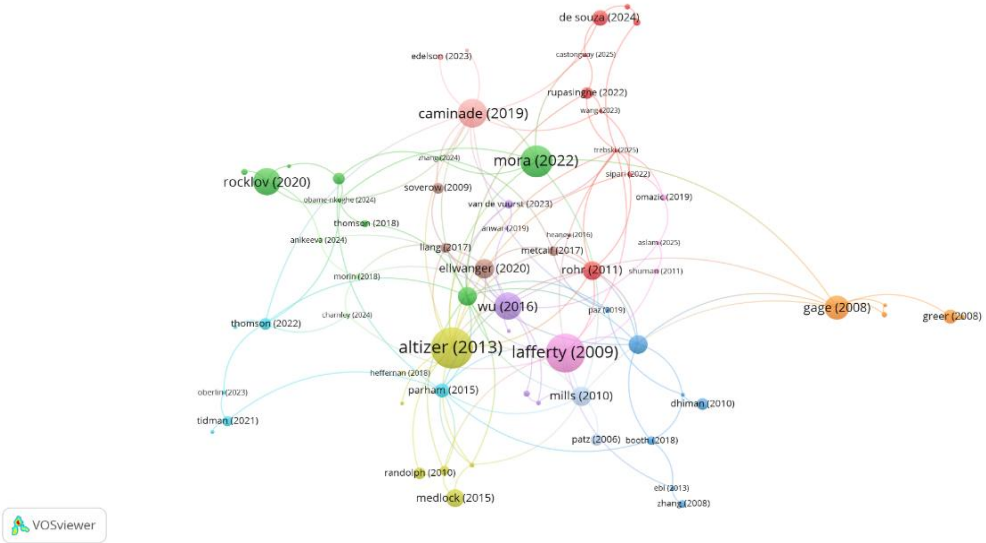


Figura 03: Rede bibliométrica de citação de documentos
Fonte: As autoras (2026)

Na tabela 01, destacam-se os cinco artigos mais citados. Nesse ranking, liderou o artigo de Altizer *et al.* (2013), intitulado *Climate Change and infections diseases: From Evidence to a Predictive Framework,* possui 943 citações, e lidera a posição de documento mais citado. O estudo discute como variáveis climáticas, especialmente temperatura e precipitação, influenciam diretamente a dinâmica de transmissão de patógenos, afetando hospedeiros, vetores e o ambiente, relação direta com saúde única**.** Além de destacar que alterações no clima podem modificar a imunidade dos organismos, aumentar a taxa de reprodução de microrganismos, alterar ciclos sazonais e expandir a distribuição geográfica de vetores e reservatórios. Em segundo lugar, o artigo de Lafferty *et al.* (2009), aborda que o aumento da temperatura acelera reações metabólicas, podendo influenciar no crescimento, reprodução e transmissão de patógenos e vetores, mas também pode reduzir a sobrevivência quando ultrapassa limites fisiológicos. Além disso, o artigo mostra que a relação entre clima e doenças é não linear e depende de múltiplos fatores, como diversidade de hospedeiros, vetores, condições ambientais e aspectos socioeconômicos.

Ranking	Título	Primeiro autor/ano	Número de citações	Revista	DOI
1°	**Climate Change and Infectious Diseases: From Evidence to a Predictive Framework**	Altizer (2013)	943	*Science*	http://doi.org/10.1126/science.1239401
2º	**The ecology of climate change and infectious diseases**	Lafferty (2009)	841	*Ecology*	http://doi.org/10.1890/08-0079.1
3º	**Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change**	Mora (2022)	627	*Nature Climate Change*	http://doi.org/10.1038/s41558-022-01426-1
4º	**mpacto f mpacto and future climate change on vector-borne diseases**	Caminade (2019)	516	*Annals of the New York Academy of Sciences*	http://doi.org/10.1111/nyas.13950
5º	**mpacto f climate change on human infectious diseases: Empirical evidence and human adaptation**	Wu (2016)	477	*Enviromental International*	http://doi.or/10.1016/j.envint.2015.09.007

Tabela 01: O ranking dos 5 documentos mais citados.
Fonte: As autoras (2026)

Mora *et al.* (2022), com 627 citações, apresentam uma análise global que quantifica a magnitude desses impactos, demonstrando que mais da metade das doenças infecciosas humanas conhecidas já foi agravada por riscos associados às mudanças climáticas. O estudo identifica diversos perigos climáticos, como aquecimento, secas, enchentes, tempestades e ondas de calor, que influenciam a transmissão de patógenos por diferentes mecanismos, incluindo a aproximação entre pessoas e agentes infecciosos, a expansão da área de ocorrência de vetores, o aumento da sobrevivência dos patógenos e o enfraquecimento da imunidade humana em decorrência de estresse ambiental e insegurança alimentar.

O quarto artigo mais citado, *Impact of recent and future climate change on vector-borne diseases,* de Caminade *et al.* (2019) o estudo apresenta evidências de mudanças regionais na distribuição de vetores e doenças, especialmente em áreas temperadas, regiões árticas e regiões montanhosas tropicais. Além disso, o artigo discute doenças importantes como malária, dengue, chikungunya e zika, mostrando que o aquecimento global pode ampliar a duração da estação de transmissão e deslocar a ocorrência dessas doenças para novas áreas.

Por fim, o quinto artigo mais citado de Wu *et al.* (2016), denominado *Impact of climate change on human infectious diseases: Empirical evidence and human adaptation,* apresenta uma revisão sistemática sobre o impacto das mudanças climáticas nas doenças infecciosas humanas e nas estratégias de adaptação. O artigo enfatiza ainda que fatores sociais e comportamentais, como urbanização e mobilidade humana, interagem com o clima, intensificando os riscos.

Análise da Coocorrência de Palavras-Chave

A análise de coocorrência de palavras-chave revelou a formação de cinco *clusters* principais, os quais representam diferentes subáreas dentro do campo de estudo (Figura 04). Ao todo, foram identificadas 450 palavras-chave, das quais 125 apresentaram pelo menos duas ocorrências. Entre os termos mais frequentes, destacaram-se "*climate change*" (34), "*temperature"* (18), "*malaria"* (15), "*transmission"* (15) e "*vector-borne diseases"* (15), sendo os valores entre parênteses correspondentes ao número de ocorrências de cada termo nos artigos analisados, o que evidencia a forte associação entre as mudanças climáticas e a dinâmica das doenças infecciosas.

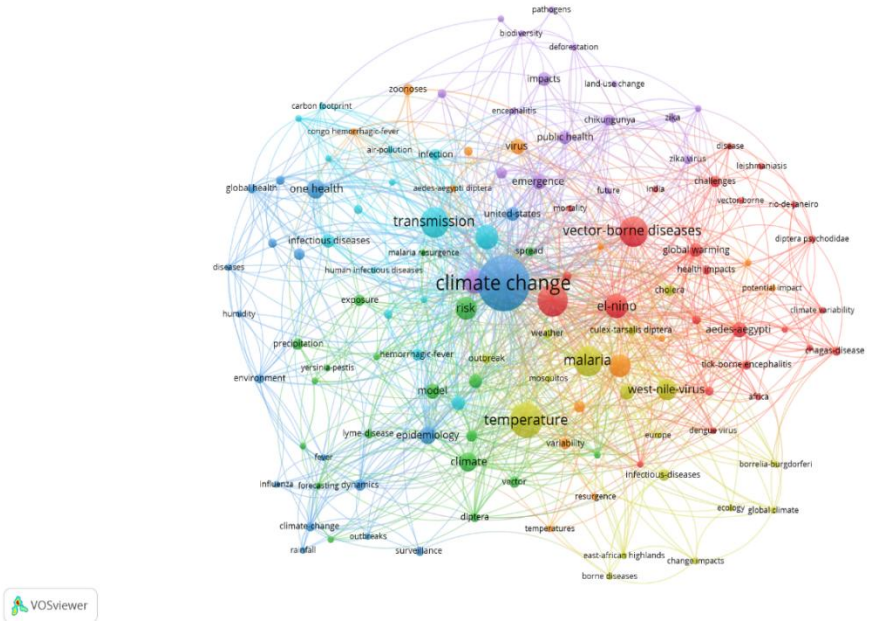


Figura 04: Rede Bibliométrica de palavras-chave.
Fonte: As autoras (2026)

Adicionalmente, termos como *"impact"* (16), "*El Niño"* (11), "*dengue*" (11) e "*healt*h" (11) reforçam a existência de subáreas consolidadas, como epidemiologia, saúde pública e variabilidade climática. A elevada interconectividade entre os termos indica um campo de caráter altamente interdisciplinar no qual "*climate change*" se configura como o núcleo central da rede, estabelecendo conexões com múltiplas temáticas. Os *clusters* identificados abrangem áreas como saúde global e a abordagem "*One Health"*, modelagem epidemiológica, doenças transmitidas por vetores e impactos ambientais. Outrossim, a presença de termos como "*zoonoses"* e "*emergence"* sugere tendências emergentes relacionadas à interface entre ambiente, clima e saúde.

Análise de Coautoria entre Países

A rede bibliométrica de países evidencia a estrutura de colaboração científica internacional, destacando a centralidade de nações com maior produção e impacto acadêmico (Figura 05). Foram analisados 57 países, com no mínimo um documento publicado sobre o tema, 47 estão interligados. Os Estados Unidos lideram com a maior produção, destacando-se entre as demais nações, com 35 documentos e 5803 citações essa liderança pode ser atribuída ao elevado investimento em pesquisa e desenvolvimento, à forte colaboração internacional e ao alto impacto das publicações científicas norte-americanas, fatores que contribuem para maior visibilidade e influência global (NSF, 2023; Gómez *et al*., 2022). Em seguida, países como Reino Unido e Suécia também se destacam como importantes polos de articulação, conectando diferentes grupos e contribuindo significativamente para a disseminação do conhecimento científico.

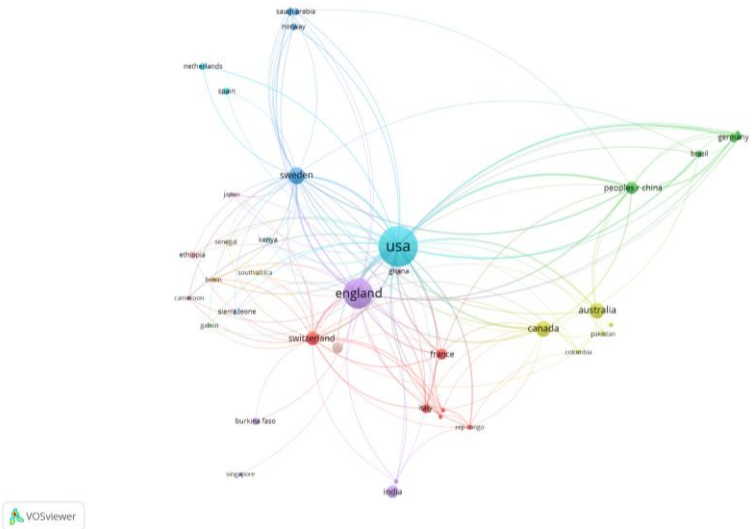


Figura 05: Rede bibliométrica de coautoria de países.
Fonte: As autoras (2026)

Países como China, Alemanha e Brasil formam um grupo com conexões expressivas, demonstrando cooperação internacional relevante, especialmente com os Estados Unidos. Outros países, como Canadá e Austrália, atuam como intermediários entre diferentes *clusters*, ampliando o fluxo de colaboração científica. Em contrapartida, países com menor produção, como Gana e Chipre, apresentam menor centralidade e conectividade, evidenciando desigualdades na participação científica global.

Análise de Citação de Autores

Na rede bibliométrica de citação de autores, foram inicialmente identificados 371 autores. Dentre esses, 360 atenderam ao critério estabelecido de possuir, no mínimo, um documento com ao menos uma citação e apresentar conexão com outros autores na rede, conforme mostrado na Figura 06.

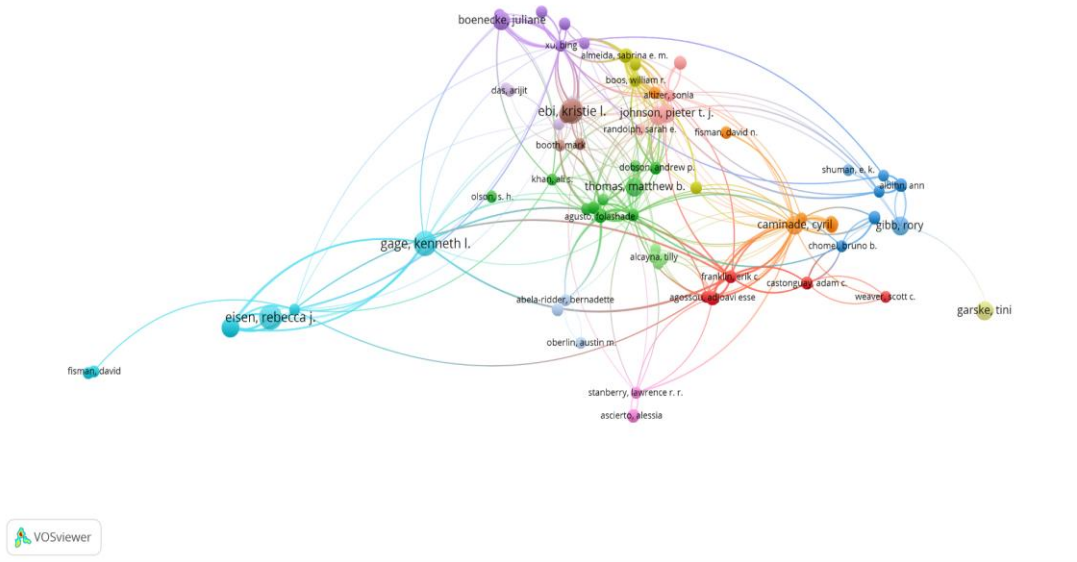


Figura 06: Rede bibliométrica de citação de autores.
Fonte: As autoras (2026)

A conexão da rede revela uma estrutura altamente interconectada, onde pesquisadores compartilham um campo científico relativamente integrado. Os autores com maior impacto científico estão delimitados com círculos de maior proporção e no posicionamento centralizado da rede, como "Johnson, pieter t. j." aparecendo com 1207 citações, indicando uma forte influência na estrutura da rede. Outro autor com impacto relevante é "Ostfeld, richard s." sendo citado 1114 vezes. A Tabela 02 mostra os cinco autores com maior número de citações, onde mostra a quantidade total de número de documentos e citações publicadas.

Autor	Nº de documentos	Total de citações
Johnson, pieter t. j.	2	1207
Ostfeld, richard s.	2	1114
Altizer, sonia	1	941
Harvell, c. drew	1	941
Kutz, susan	1	941

Tabela 02: Os cinco autores mais citados e suas publicações.
Fonte: As autoras (2026)

Considerações Finais

A análise bibliométrica evidenciou que a produção científica sobre mudanças climáticas, eventos extremos e seus impactos na Saúde Única apresenta crescimento significativo ao longo do tempo, especialmente na última década, refletindo a consolidação e a crescente relevância do tema no cenário científico global. A evolução temporal das publicações, associada ao aumento das citações, indica não apenas maior interesse acadêmico, mas também o amadurecimento das pesquisas, com destaque para estudos clássicos e altamente citados que estruturam a base teórica da área.

Além disso, as redes bibliométricas demonstraram um campo altamente interdisciplinar e interconectado, no qual diferentes subáreas como epidemiologia, variabilidade climática, doenças transmitidas por vetores e abordagem Saúde Única, se articulam de forma integrada. A análise de palavras-chave reforçou a centralidade das mudanças climáticas na dinâmica das

doenças infecciosas, enquanto a rede de coautoria evidenciou a predominância de países com maior investimento em pesquisa, como os Estados Unidos, ao mesmo tempo em que revelou desigualdades na participação científica global. Dessa forma, os resultados destacam a importância de fortalecer pesquisas colaborativas e abordagens integradas, contribuindo para o avanço do conhecimento e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação e adaptação frente aos impactos das mudanças climáticas na saúde única.

Agradecimentos

Agradecimento à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) pelo suporte institucional ao longo da trajetória acadêmica. Expressa-se sincera gratidão aos professores da UFRPE, cujo compromisso com o ensino, a pesquisa e a formação crítica foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ALTIZER, S. et al. Climate change and infectious diseases: from evidence to a predictive framework. **Science**, v. 341, n. 6145, p. 514–519, 2013. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1239401.

CAMINADE, C. et al. Impact of climate change on global malaria distribution. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1436, n. 1, p. 139–154, 2019. DOI: https://doi.org/10.1111/nyas.13950.

CASTRO, N. J. C. et al. Mudanças climáticas e impactos nos serviços de saúde. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, Brasília, v. 33, n. 2, 2024. DOI: https://doi.org/10.1590/S2237-96222023000200001.

EYZAGUIRRE, I. A. L. et al. The effects of climate change on health: a systematic review. **Climate**, v. 13, n. 10, p. 204, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/cli13100204.

GÓMEZ, C. J.; HERMAN, A. C.; PARIGI, P. Leading countries in global science increasingly receive more citations. **Nature Human Behaviour**, v. 6, p. 1340–1347, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41562-022-01351-5.

LAFFERTY, K. D. The ecology of climate change and infectious diseases. **Ecology**, v. 90, n. 4, p. 888–900, 2009. DOI: https://doi.org/10.1890/08-0079.1.

MORA, C. et al. Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change. **Nature Climate Change**, v. 12, p. 869–875, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41558-022-01426-1.

NSF-NATIONAL SCIENCE FOUNDATION. **Publications output: U.S. trends and international comparisons**. Alexandria: National Center for Science and Engineering Statistics, 2023. Disponível em: https://ncses.nsf.gov/pubs/nsb202333/. Acesso em: 16 abr. 2026.

SOEIRO-BARBOSA, D. et al. The São Paulo declaration on One Health: Brazil's path forward to face intersectoral health challenges. **One Health Outlook**, v. 7, 2025. DOI: https://doi.org/10.1186/s42522-025-00157-5.

WINKLER, A. S. et al. The Lancet One Health Commission. **The Lancet**, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/S0140-6736(25)00627-0.

WU, X. et al. Impact of climate change on human infectious diseases: empirical evidence and human adaptation. **Environment International**, v. 86, p. 14–23, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.09.007.

ZHANG, R. et al. From concept to action: a united, holistic and One Health approach to respond to the climate change crisis. **Infectious Diseases of Poverty**, v. 11, 2022. DOI: https://doi.org/10.1186/s40249-022-00941-9.

DINÂMICA DAS CHUVAS E VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL NO RECIFE: UMA ANÁLISE DE 25 ANOS NA ESTAÇÃO ALTO DA BRASILEIRA

1 Ismael César Caldas Lopes, 2 Ioneide Alves de Souza, 3 Mirella Mayara Maria da Silva Lira, 4 Laysa Haddarany Vilela Oliveira

1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail:ismael.lopes@ufrpe.br; 2 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail:ioneide.alves@ufrpe.br; 3 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: mirella.lira@ufrpe.br; 4 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail:laysa.oliveira@ufrpe.br

Palavras-chave: Variabilidade climática; Risco; Desastre.

Resumo

Embora a dinâmica hidrológica seja essencial para o funcionamento dos sistemas socioambientais, a intensificação de eventos hidrometeorológicos extremos tem desafiado a resiliência de metrópoles. No Recife, essa vulnerabilidade é intensificada pela convergência entre uma geomorfologia de encostas com declividades acentuadas e processos de urbanização desordenada, tornando-se suscetível a uma maior incidência de desastres. Apesar do reconhecimento geral desse cenário, ainda carece na literatura conexões entre as causas e consequências da variabilidade climática aos impactos ambientais locais, especialmente sobre a óptica de grupos sociais em condições de elevada susceptibilidade. Diante disso, este trabalho objetivou investigar a dinâmica das chuvas ao longo de 26 anos (2000-2025), avaliando a vulnerabilidade socioambiental associada e relacionar padrões de precipitação com riscos hidrológicos urbanos. A pesquisa foi desenvolvida com base na análise de dados pluviométricos da estação Alto da Brasileira, localizada no bairro da Guabiraba, Recife-PE, tratada por uma variação do Método da Ponderação Regional e validada pela Curva de Dupla Massa. Aplicou-se estatística descritiva e o Índice de Anomalia Relativa (IAR) para categorizar a severidade hidrológica, correlacionando os dados às diretrizes de risco do Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR). Os dados revelam um regime de alta sazonalidade, com picos extremos em 2000, 2011 e 2022 que superam 2.600 mm, indicando um tempo de retorno de aproximadamente 11 anos para eventos críticos. Identificou-se que a fragilidade geológica e declividades acentuadas potencializam o risco, principalmente em regiões periféricas. Conclui-se que a variabilidade pluviométrica, contribui para tragédias em áreas negligenciadas, consubstanciando o conceito de racismo ambiental. O estudo consolida um subsídio técnico fundamental para o planejamento urbano, exigindo estratégias de mitigação e a aplicação de princípios de cidades sustentáveis.

Introdução

No Brasil, embora o país apresente significativa disponibilidade hídrica em termos globais, sua distribuição no espaço e no tempo é bastante heterogênea, sendo a região Nordeste uma das mais vulneráveis à irregularidade das chuvas (ANA, 2019). De acordo com Aloufa e Cavalcante (2014), associado a um crescimento desordenado que contribui com uma insustentabilidade urbana, essa variabilidade pluviométrica compromete a segurança hídrica e impõe desafios à gestão dos recursos hídricos, sobretudo em áreas densamente ocupadas (ANA, 2019). Diante desse contexto, a cidade do Recife apresenta características climáticas tropicais úmidas, com forte influência de sistemas meteorológicos que condicionam a ocorrência de chuvas ao longo do ano (INMET, 2020). A intensa urbanização, aliada à impermeabilização do solo e às limitações da infraestrutura de drenagem, potencializa problemas como alagamentos e dificuldades no manejo adequado das águas pluviais (IBGE, 2021). Dessa forma, a compreensão da dinâmica da precipitação é essencial para o planejamento urbano e ambiental.

De acordo com Nery e Carfan (2013), precipitação é a designação para os hidrometeoros (chuva, neve, chuvisco) que caem das nuvens em direção ao solo, sendo responsável pela recarga dos mananciais superficiais e subterrâneos. No entanto, sua distribuição não ocorre de maneira homogênea no espaço, o que assinala a variabilidade espacial da chuva. Segundo Wilfried Brutsaert (2005), essa variabilidade pode ser influenciada pelo relevo, uso e ocupação do solo e condições atmosféricas locais. Além disso, os sistemas climáticos de grande escala, como El Niño e La Niña, também contribuem com a distribuição geograficamente heterogênea das chuvas, o que assinala a necessidade de uma análise integrada e detalhada. A análise da dinâmica das chuvas, compreendida a partir da distribuição temporal e da variabilidade ao longo de séries históricas, é fundamental para a identificação de padrões, tendências e anomalias no regime pluviométrico.

Nesse sentido, integrar essa análise à vulnerabilidade socioambiental é importante para contribuir com as ações de gestão e planejamento, isso porque fenômenos naturais catastróficos tem seus efeitos potencializados, em termos de impactos socioeconômicos, quando atingem grupos sociais que vivem estados de pobreza e apresentam condições de elevada susceptibilidade (ALVES; CORREA; SILVA, 2024). Dessa forma, a estação pluviométrica Alto da Brasileira, localizada no bairro de Nova Descoberta, na cidade do Recife, apresenta-se como um ponto estratégico para a análise dessas dinâmicas, o que possibilita uma compreensão mais aprofundada do comportamento das chuvas em nível local.

Sendo assim, este trabalho tem como objetivos analisar a dinâmica das chuvas ao longo de 26 anos (2000-2025), avaliar a vulnerabilidade socioambiental associada e relacionar padrões de precipitação com riscos hidrológicos urbanos, a fim de apoiar o planejamento urbano sustentável, subsidiando a implementação de políticas públicas que contribuam com a redução de riscos socioambientais da região estudada.

Material e Métodos

O presente estudo foi desenvolvido no município do Recife, capital de Pernambuco (Figura 01). A área territorial da cidade do Recife apresenta 218,843 km², com 1.488.920 habitantes (IBGE, 2022). A pesquisa foi desenvolvida com base na análise dos dados pluviométricos do posto do Alto da Brasileira (Latitude -8,001; Longitude -34,935), localizada no bairro da Guabiraba, Recife-PE. A estação se localiza em uma zona de morro da cidade a aproximadamente 85 m de altitude, integrando os 67,43% de áreas acidentadas do município, com altitudes obtidas via Modelos Digitais de Elevação (SRTM/NASA) processados na plataforma OpenTopography (2026).

De acordo com Saboya et al. (2021) o clima do município é do tipo Am (clima de monção), pela classificação de Köppen, ou seja possuindo uma precipitação anual média >1500 mm e <60 mm no mês mais seco. Quanto às características pedológicas, o solo local é essencialmente areno-argiloso composto de caulinitas e ilitas. A alteração das rochas vulcânicas básicas na região resulta na formação de filossilicatos de ferro e magnésio, favorecendo a ocorrência dos solos argilosos expansivos, fatores que contribuem para a instabilidade das encostas (Villa Verde; Santos, 2019).



Figura 01: Mapa de Localização do Município de Recife, estado de Pernambuco e Brasil.
Fonte: Ferreira, Venâncio e Sá (2017).

Para a análise da série histórica, realizou-se a etapa de coleta e organização dos dados pluviométricos obtidos no banco de dados oficial da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). O conjunto amostral da estação Alto da Brasileira compreende um período de 26 anos (312 meses), de janeiro de 2000 a dezembro de 2025. Adicionalmente, foram extraídas as séries históricas das estações Camaragibe, Jaboatão dos Guararapes (Barragem Duas Unas), Olinda (Academia Santa Gertrudes), Paulista e Recife (Várzea), visando a comparação regional e o preenchimento de lacunas da estação alvo. Os dados foram organizados em planilha eletrônica, a qual constituiu a base para o tratamento e análise estatística.

Visando garantir a confiabilidade dos registros dos postos do Alto da Brasileira, realizou-se um pré-processamento envolvendo a verificação de consistência da série, identificação de possíveis falhas, e remoção de outliers, por meio da variação do Método da Ponderação Regional (PR), fundamentado em Tucci (2001) e referenciado por Bellinaso et al. (2024). Nesta abordagem, a substituição de registros deu-se apenas nos meses em que o erro relativo entre a estação alvo e a média do conjunto regional superou o limiar de 20%. A estimativa para a estação Alto da Brasileira foi obtida através da média aritmética simples dos registros mensais concomitantes do conjunto regional (Equação 01). Para a validação final da homogeneidade da série tratada, aplicou-se o método da Dupla Massa, desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS).

Complementarmente, a série foi submetida a uma análise estatística descritiva, extraindo-se parâmetros de tendência central e dispersão, como as precipitações médias e totais (anuais e mensais), a média de precipitação da série (Equação 02), seu desvio padrão amostral (Equação 03) e o coeficiente de variabilidade (Equação 04). A partir disso, foram elaborados gráficos que representam a precipitação média anual, a média de precipitação mensal das amostras, o gráfico Índice de Anomalia Relativa (IAR), além da proporção das classes de severidade hidrológica, que contribuíram para uma verificação estatística dinâmica e visual dos dados.

Adicionalmente, utilizaram-se índices de anomalia climática para identificar anos de predominância de eventos extremos relacionados a fenômenos de macroescala, como *El Niño*, *La Niña* e em períodos neutros, em conformidade com as definições da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2026). Para a caracterização qualitativa da série histórica, aplicou-se o Índice de Anomalia Relativa (IAR) (Equação 05), que consiste em uma variação do *Percent of Normal Precipitation Index (PNPI)* proposto por Asrari, Masoudi e Afrough (2011). O Índice de Anomalia Relativa (IAR) permitiu categorizar a severidade hidrológica em sete classes adaptadas de Gois et al. (2024), sendo elas: seca extrema ($I \leq -0,6$), seca forte ($-0,6 \leq I < -0,4$), seca moderada ($-0,4 \leq I < -0,2$), situação normal ($-0,2 \leq I \leq 0,2$), chuvoso ($0,2 < I \leq 0,4$), muito chuvoso ($0,4 < I \leq 0,6$) e extremamente chuvoso ($I > 0,6$). A metodologia facilitou a identificação de episódios críticos e sua correlação com a vulnerabilidade socioambiental do Recife.

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \qquad (01)$$

Onde: Y é a precipitação do posto a ser estimada, x_i são os registros mensais das estações vizinhas concomitantes ao período de falha ou inconsistência e n é o número de estações utilizadas no conjunto regional para o cálculo da média.

$$P_{médiaS} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i}{n} \quad (02)$$

Onde: $P_{médiaS}$ é a precipitação média da série, P_i é a precipitação anual e n é o número de anos

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (P_i - P_{médiaS})^2}{n-1}} \quad (03)$$

Onde: S é o Desvio Padrão Amostral, P_i é a precipitação anual, $P_{médiaS}$ é a precipitação média da série e n é o número de anos.

$$CV = \frac{S}{P_{médiaS}} \cdot 100 \quad (04)$$

Onde: CV é o Coeficiente de Variabilidade, $P_{médiaS}$ é a precipitação média da série e S é o desvio padrão amostral.

$$I = \frac{P_{anual} - P_{média}}{P_{média}} \quad (05)$$

Onde: I é o Índice de Anomalia Relativa, P_{anual} é a precipitação total do ano avaliado e $P_{média}$ é a média climatológica da série histórica (2000 – 2025).

Após o tratamento dos dados, os resultados pluviométricos foram interpretados à luz das condições urbanas e socioambientais da área de estudo, permitindo estabelecer relações entre a dinâmica das chuvas e a vulnerabilidade socioambiental. Essa abordagem possibilitou compreender de que forma os padrões de precipitação podem influenciar a ocorrência de impactos urbanos, como alagamentos e outros eventos associados, conforme as diretrizes de análise de risco do Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR). Sendo assim, todos os procedimentos metodológicos adotados visam garantir a consistência, confiabilidade e relevância dos resultados, alinhando-se aos estudos de Lima et al. (2025), que destacam a forte correlação entre a urbanização desordenada da Região Metropolitana do Recife (RMR) e o aumento da suscetibilidade a desastres hidrológicos frente a eventos extremos de precipitação.

Resultados e Discussão

O tratamento dos dados com erro relativo superior a 20% resultou na correção de 151 dos 312 meses avaliados, o que representa aproximadamente 48% da série histórica. Enquanto estudos recentes, como o de Bellinaso et al. (2024), destacam os desafios de consistência em séries curtas, o rigor aplicado nesta pesquisa por meio da variação do Método da Ponderação Regional (PR) permitiu assegurar a homogeneidade da série de 26 anos da estação Alto da Brasileira. A validação estatística, expressa pela curva de Dupla Massa (Figura 02), apresentou um coeficiente de determinação (R^2) igual a 1, mostra que a variabilidade pluviométrica integra-se ao comportamento climático das estações consistentes da RMR.

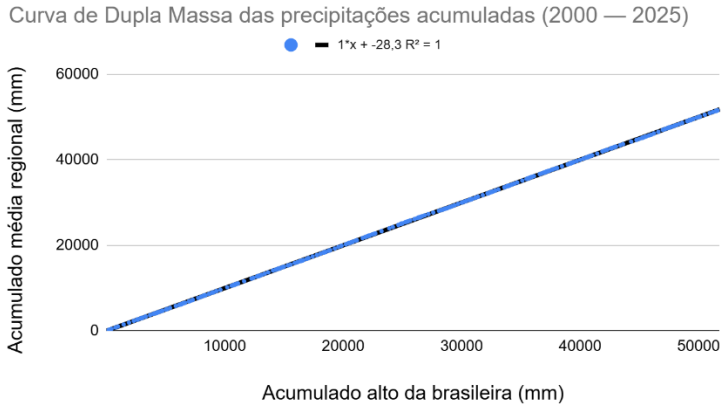


Figura 02: Curva de Dupla Massa das precipitações acumuladas (2000 – 2025).
Fonte: Autores, 2026

Para a compreensão pluviométrica da cidade do Recife ao longo do período de um ano, realizou-se a média da precipitação mensal entre os 26 anos de amostra (Figura 03). A análise da variabilidade pluviométrica mensal ao longo da série histórica indicou um regime caracterizado por elevada sazonalidade entre os meses. Os elevados desvios padrão observados no pico do inverno sugerem uma significativa variabilidade interanual, onde a ocorrência de anomalias positivas podem elevar os totais mensais a patamares críticos, potencializando riscos de movimentos de massa e inundações na bacia em estudo.

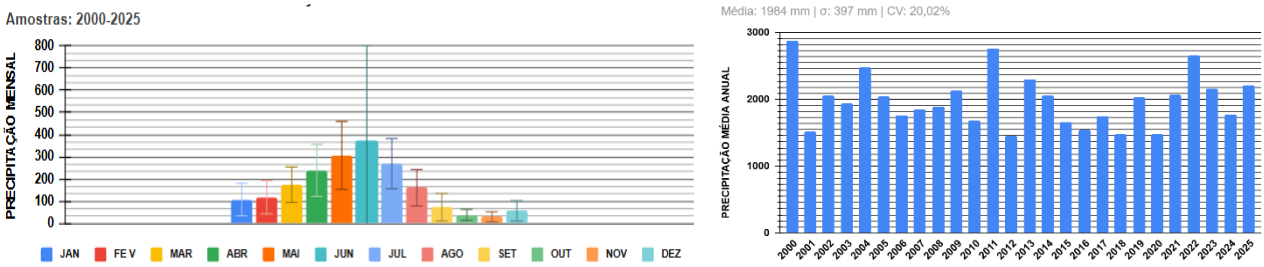


Figura 03: Média da Precipitação Mensal das Amostras e os Desvios Padrões e Precipitação Média Anual (mm) – Estação Alto da Brasileira (2000 – 2025), respectivamente.
Fonte: Autores, 2026.

Visando o entendimento da maneira em que os anos se comportam dentro da série histórica, foi realizada a precipitação anual média (Figura 03), que permitiu a identificação de anos de eventos extremos na cidade do Recife. A variabilidade entre os anos dentro da série histórica apresentou um comportamento dinâmico, destacando-se eventos extremos como os registrados em 2000, 2011 e 2022, indicando um Tempo de Retorno (TR) de aproximadamente 11 anos entre picos de precipitação intensa. Essa alternância entre extremos climáticos potencializa riscos socioambientais, uma vez que a infraestrutura urbana da região não acompanha, de forma homogênea, essa variabilidade. O Coeficiente de Variação (CV) de 20,02% (calculado conforme a Eq. 04) quantifica a dispersão dos dados em relação à média de 1.984 mm e justifica o emprego do Índice de Anomalia Relativa (IAR) (Figura 04) para a categorização precisa dos desvios e identificação dos extremos hídricos.

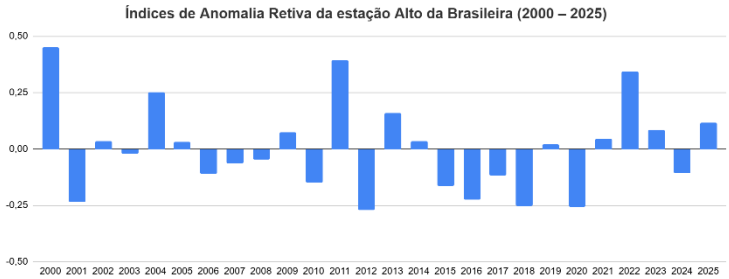


Figura 04: Índices de Anomalia Relativa da Estação Alto da Brasileira (2000 – 2025).
Fonte: Autores, 2026.

A variabilidade evidenciada na Figura 04 demonstra que as anomalias positivas de 2000, 2011 e 2022 atingiram o patamar de "Muito Chuvoso" nas classes de severidade hidrológica da estação Alto da Brasileira. Embora essa classe representa apenas 3,8% da série histórica (Figura 05), observa-se a ausência de eventos nas categorias "Extremamente Chuvoso", "Seca Extrema" e "Seca Forte" no contexto amostral desta estação. Em contrapartida, a predominância de anos "Normais" (65,4%) indica que na maior parte da série histórica predominou a conformidade com a média climatológica local, evidenciando que os desvios críticos, embora numericamente minoritários, definem os picos de instabilidade do regime.

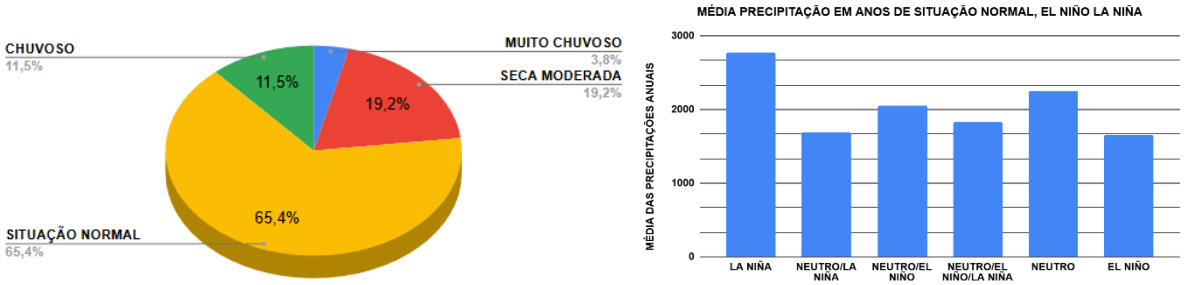


Figura 05: Distribuição percentual das classes de severidade climática para a Estação Alto da Brasileira (2000 – 2025) e Média de precipitação em anos de situação normal, de El Niño e La Niña, respectivamente.
Fonte: Autores, 2026

A interpretação dos padrões pluviométricos associada à análise de anos atípicos, ou seja, os que foram marcados pela ocorrência de El Niño ou La Niña, sugere a influência de fenômenos climáticos de macroescala sobre o regime pluviométrico da área de estudo (Figura 0**5**). Nesse contexto, destaca-se a atuação do El Niño–Oscilação Sul, cuja fase quente (El Niño) esteve associada em diversos períodos à redução dos totais pluviométricos, enquanto a fase fria (La Niña), apresentou correspondência com o aumento das precipitações, quando comparados aos anos em que houve predominância da neutralidade.

Essa dependência de elementos climáticos externos evidencia a vulnerabilidade sistêmica da região estudada diante das mudanças climáticas e da variabilidade natural do clima. A sazonalidade bem definida, com concentração das chuvas entre abril e julho (Figura 03), contribui para a intensificação dos impactos socioambientais. Durante esse período, há sobrecarga dos sistemas de drenagem urbana, o que resulta em alagamentos recorrentes, além de que a saturação do solo em áreas de encosta aumenta a probabilidade de movimentos de massa, colocando em risco populações já vulneráveis. Dessa forma, os resultados indicam que a variabilidade pluviométrica da área de estudo não se restringe a fatores locais, apenas, sendo fortemente influenciada por mecanismos atmosférico-oceânicos de escala global e regional (PEREIRA et al., 2018).

Já a análise hipsométrica da cidade do Recife (Figura 06) indicou uma distribuição altimétrica heterogênea, caracterizada pela presença de encostas com declividades acentuadas intercaladas por áreas de menor cota altimétrica, configurando um ambiente geomorfologicamente suscetível, visto que esses parâmetros são controladores primordiais da suscetibilidade a movimentos de massa (RIFFEL et al., 2021).

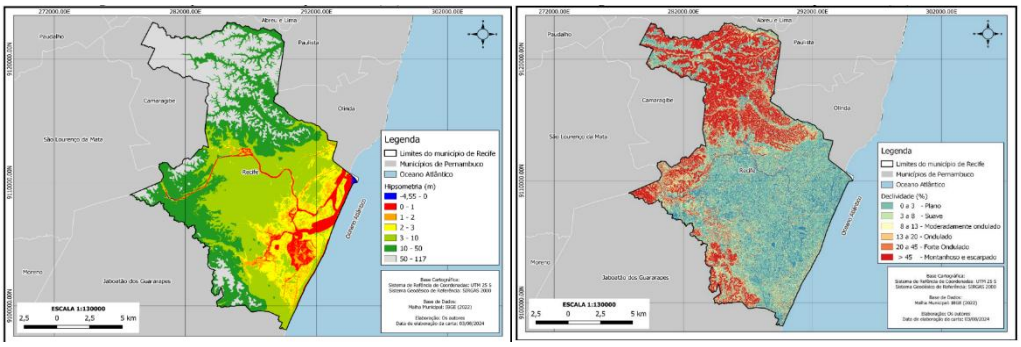


Figura 06: Mapa Hipsométrico e de Declividade da cidade do Recife, respectivamente.
Fonte: Sistema Geodésico de Referência SIRGAS (IBGE, 2022) (Lima et. al, 2024).

Além disso, a declividade do município é um fator determinante para a ocorrência de inundações no município. Isso porque a maior parte da Cidade se localiza em uma Planície Costeira de baixa inclinação, o que favorece a retenção de água durante as chuvas intensas (LIMA et. al., 2025). As áreas mais planas, principalmente na região central e nas zonas baixas da cidade, são as mais propensas a acumular grandes volumes de água em períodos chuvosos. No entanto, nas regiões periféricas, como no norte e oeste do Município, a declividade é mais acentuada, com terrenos ondulados que favorecem o escoamento superficial. Com isso, a integração entre o perfil hipsométrico e os dados pluviométricos indicou que episódios de chuva intensa atuam como estopim para a ocorrência de desastres naturais, potencializando processos erosivos e instabilidades geomorfológicas.

Segundo Villa Verde e Santos (2019), o Recife possui um solo areno-argiloso composto de caulinitas e ilícitas provenientes do embasamento cristalino, que tem um papel relevante nas ocorrências de deslizamentos, que, segundo Guimarães e Florenzano (2008), são movimentos de descida de solos e rochas sob o efeito da gravidade, geralmente potencializado pela ação da água. Além disso, o relevo maduro e a falta de cobertura vegetal nas encostas contribuem para os processos erosivos, estes que são potencializados por ocupações espontâneas e não planejadas.

Nesse contexto, a ocupação urbana desordenada provocou mudanças drásticas no uso e ocupação do solo (Figura 07), substituindo a vegetação natural por asfalto e concreto. Essa impermeabilização impede a infiltração da água, agravando os impactos hidrológicos ocasionados pelas chuvas.

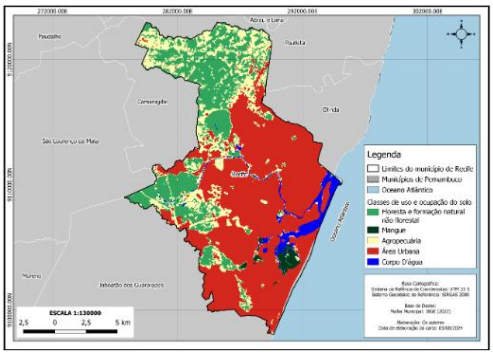


Figura 07: Mapa de Uso e Ocupação do solo
Fonte: Sistema Geodésico de Referência SIRGAS (IBGE, 2022)(Lima et. al, 2024).

Corroborando com essa perspectiva, destaca-se o estudo realizado pela Prefeitura da Cidade do Recife em parceria com o Banco de Desenvolvimento da América Latina (CAF, 2019), denominado “Análise de Riscos e Vulnerabilidade Climáticas e Estratégia de Adaptação do Município do Recife - Pe”, no qual objetivou identificar e priorizar medidas concretas de adaptação

à mudança do clima, fundamentadas em uma análise rigorosa de risco climático para os horizontes temporais atual e futuro (2011-2040). A análise, por sua vez, considerou os impactos das alterações climáticas sobre os sistemas sociais, econômicos e ambientais da capital pernambucana, destacando os riscos associados a inundações, onde concentra-se nas regiões centrais e ao longo das bacias dos rios Capibaribe e Beberibe, e deslizamentos concentrando-se em regiões com alta declividade e ocupação irregular, elevando a vulnerabilidade da população nessas zonas, conforme a Figura 08, do lado esquerdo referente às inundações e direito aos deslizamentos.

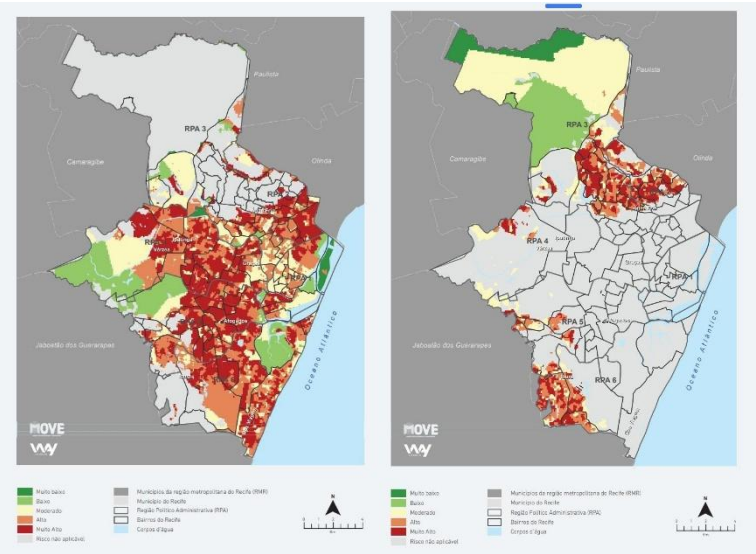


Figura 08: Mapa de risco crítico de inundações e deslizamentos, respectivamente.
Fonte: Recife, 2019.

A partir da análise do Figura 08, é notório que os mapas de susceptibilidade à inundações e deslizamentos tem uma correlação espacial inversa, isso é dado através da hipsometria da cidade do Recife, em que cotas mais baixas estão próximas ao nível do mar, sendo impactada por sua variação (Silva Júnior, 2015). Já as cotas mais altas estão com risco ao deslizamento devido a fatores geológicos e antrópicos, como frequência de pontos de lançamento de lixo e de pontos de vazamentos/lançamento de águas, que se tornam responsáveis pela saturação do solo (Villa Verde; Santos, 2019). Essa segregação socioespacial expõe a população mais vulnerável aos picos de precipitação identificados na Figura 04, transformando anomalias classificadas como “Muito Chuvosas” em tragédias correntes nessas zonas de risco.

Ademais, a análise da carência de planejamento, relatórios de auditorias operacionais realizadas pelo Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco (TCE-PE, 2012) já evidenciaram que a vulnerabilidade nas encostas do Recife não é um fenômeno meramente natural, apontando que o risco é exacerbado pela combinação de condicionantes geológicos-geotécnicos predisponentes com a insuficiência de intervenções estruturantes por parte do poder público. Segundo os critérios técnicos da Defesa Civil (CODECIR), validados pelo referido órgão, o risco é categorizado em níveis R1 a R4, variando da estabilidade à criticidade máxima, conforme a gravidade das evidências de instabilidade e a probabilidade de danos no período de um ano, considerando condicionantes geológicos-geotécnicos e falta de intervenção.

Do ponto de vista socioambiental, os anos classificados como “Muito Chuvoso” apresentam forte correlação com o aumento de desastres, como inundações e deslizamentos de encostas. As consequências trágicas desses eventos foram expostas entre os dias 30/07/2000 e 01/08/2000, período que registrou 22 mortos, 100 feridos e mais de 60 mil pessoas desabrigadas na Região Metropolitana do Recife (RMR), além de mais de 100 deslizamentos de barreiras (Anjos et al., 2024). De forma análoga, em maio de 2022, o evento extremo identificado como o maior pico da série histórica nesta pesquisa resultou em 127 óbitos, com destaque para a comunidade de Jardim Monte Verde (Cohab), onde o soterramento de residências causou mais de 20 mortes. Nesse contexto, os resultados evidenciam que a variabilidade pluviométrica deve ser compreendida em articulação com fatores sociais, econômicos e territoriais. A convergência entre extremos climáticos e desigualdades socioespaciais amplia a vulnerabilidade latente, configurando o cenário típico de risco socioambiental recifense.

Considerações Finais

A análise da dinâmica pluviométrica na estação Alto da Brasileira (2000 a 2025), permitiu consolidar uma base de dados robusta para a compreensão dos riscos hidrometeorológicos no Recife, os resultados indicam que a acentuada variabilidade interanual e os elevados coeficientes de dispersão transcendem a métrica estatística, caracterizando-se como condicionantes de deflagração em encostas com elevada susceptibilidade física. A convergência entre estes indicadores e as directrizes do Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR), revela que a persistência de níveis críticos de risco (R4) no Alto da Brasileira não é um evento isolado, mas o reflexo de disparidades socioespaciais consubstanciadas no conceito de racismo ambiental, visto que acaba por afetar desproporcionalmente moradias irregulares situadas nessas áreas de risco.

Evidenciou-se que a magnitude dos impactos observados é intensificada pela lacuna histórica de intervenções estruturantes e políticas de contenção, resultando na exposição desproporcional de populações vulneráveis a fenômenos de elevada previsibilidade técnica. A validação da série histórica comprovou que a variabilidade local é um reflexo fiel do comportamento climático regional.

Neste sentido, a consolidação desta série de 26 anos constitui um subsídio fundamental para o planejamento urbano do Recife, servindo de base para o redimensionamento de sistemas de drenagem e para o projetos de obras de estabilização. Torna-se de suma importância interromper o nexo de causalidade entre a precipitação extrema e o desastre socioambiental, fazendo o uso dos estudos referentes às suscetibilidades e o manejo correto, em vista do cenário agravante das mudanças climáticas, exigindo a aplicabilidade de conceitos de cidades sustentáveis. Como desdobramento deste estudo, recomenda-se a integração de modelos preditivos com indicadores de vulnerabilidade social dinâmica, visando a resiliência urbana e a promoção da justiça ambiental em metrópoles tropicais.

Agradecimentos

Agradecemos à comissão organizadora do congresso pela oportunidade de apresentação deste trabalho e aos revisores pelas valiosas contribuições. Além disso, somos gratos à Universidade Federal Rural de Pernambuco, ao Departamento de Tecnologia Rural e à docente Ioneide Alves, pelo suporte acadêmico e incentivo ao desenvolvimento da pesquisa. Por fim, agradecemos a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste estudo.

Referências Bibliográficas

ALVES, N. DE S.; CORREA, A. C. G.; SILVA, I. R. DA .. Riscos e Vulnerabilidade socioambiental urbana em Iranduba-Amazonas. Geopauta, v. 8, p. e14300, 2024.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2019: Informe Anual*. Brasília: ANA, 2019.

ANJOS, Lillian Souza dos et al. Resgate histórico dos eventos extremos de precipitação e seus impactos no município do Recife-PE. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, v. 34, p. 337-359, jan./jun. 2024.

ANJOS, Rafael Silva dos. Modelagem espacial de doenças e suas relações com fatores socioeconômicos, morfoclimáticos e infraestruturais. 2021. 142 f. Tese (Doutorado) -Curso de Geografia, UFPE, Recife, 2021.

ASRARI, Elham; MASOUDI, Masoud; AFROUGH, Elham. **Analyzing spatial and temporal pattern of humid, normal and drought years using percent of normal precipitation index (PNPI) in Fars Province, Iran**. Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation, Surabaya, v. 6, n. 3, p. 299-308, set. 2011. Disponível em: http://www.trisanita.org/jases. Acesso em: 19 mar. 2026

BELLINASO, T. B.; SCHNEIDER, V. E.; UHDE, L. T. **Avaliação da consistência de séries pluviométricas utilizando o método da dupla massa com preenchimento de falhas utilizando regressão linear**. In: XVII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, João Pessoa, 2024.

BRUTSAERT, Wilfried. *Hydrology: An Introduction*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

CASTRO, Josué de. Um ensaio de geografia urbana: A cidade do Recife. Recife: Fundação Joaquim Nabuco, Editora Massangana, 2013.

CAVALCANTE, J. da Silva Ibiapina e M. A. Ibrahim Aloufa (2014), "Percepção de riscos ambientais: uma análise sobre riscos de inundações em Natal-RN, Brasil", Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 84, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 54-68, doi: 10.14350/rig.33709.

FERREIRA, C.; VENÂNCIO, W.; SÁ, L. A. C. M. Mapeamento colaborativo: identificação espacial de creches e abrigos no município de Recife. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 27.; EXPOSICARTA, 26., 2017, Rio de Janeiro. Anais[...]. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia (SBC), 2017. p. 373-377.

GOIS, Givanildo de *et al*. **Índice de anomalia de chuva e sua associação ao El Niño-Oscilação Sul (ENOS) em Rio Branco (AC), Brasil**. Caminhos de Geografia, Uberlândia, v. 25, n. 99, p. 237–254, 2024. DOI: https://doi.org/10.14393/RCG259970556. Disponível em: http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/70556. Acesso em: 29 mar. 2026.

GUIMARÃES, R. F. et al. Movimentos de Massa. In: FLORENZANO, T. G. Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. Cap. 6, p. 159 – 184.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Cidades e Estados: Recife*. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br. Acesso em: 20 mar. 2026.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Normais Climatológicas do Brasil 1981–2010*. Brasília: INMET, 2020.

NERY, Jonas Teixeira; CARFAN, Ana Claudia. Glossário de termos técnicos em Meteorologia e Climatologia. Jundiaí: Paco Editorial, 2013.

LIMA, Lucas Domingos de Barros *et al*. Mapeamento de áreas suscetíveis a inundações na cidade do Recife-PE/Brasil. **Espaço em Revista**, Catalão, v. 27, n. 1, p. 21-44, 2025. DOI: https://doi.org/10.70261/er.v27i1.74841. Disponível em: https://periodicos.ufcat.edu.br/index.php/espaco/article/view/74841. Acesso em: 16 mar. 2026.

MONTE, Camilla Aryana da Silva; ALBUQUERQUE, Mariana Zerbone Alves de. Expansão da mancha urbana e supressão de áreas verdes na periferia do Recife. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA URBANA, 17. (SIMPURB), 2022, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: [s. n.], 2022. p. 1-20.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (Estados Unidos). Climate Prediction Center. **Relative Oceanic Niño Index (RONI)**: Historical El Niño / La Niña episodes (1950–Present). College Park: NOAA/NWS, [2026]. Disponível em: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso/roni/. Acesso em: 29 mar. 2025.

OPENTOPOGRAPHY. **High-Resolution Topography Data and Tools**. Disponível em: https://opentopography.org. Acesso em: 26 mar. 2026.

PERNAMBUCO. **Tribunal de Contas do Estado. Relatório Consolidado de Auditoria Operacional** – Processo TC nº 1002037-8: avaliação das ações de prevenção de deslizamentos em encostas – Prefeitura do Recife. Recife, 2012. Disponível em: https://share.google/hVomMG93vYkUij9ov. Acesso em: 30 mar. 2026.

RECIFE. Prefeitura Municipal. Parceria: Programa de Gestão de Risco com Participação Popular. Recife: Secretaria Executiva de Defesa Civil, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/protecao-e-defesa-civil/boas-praticas/008_boaspraticas_iniciativacomunidades_programa_parceria_recife_pe_fev2022.pdf. Acesso em: 25 mar. 2024.

RIFFEL, E. S.; GUASSELLI, L. A.; RUIZ, L. F. C.; GAMEIRO, S. Relação entre ponto de ruptura e padrão morfométrico em deslizamentos, bacia hidrográfica do Rio Rolante - RS. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 41, e181554, 2021. DOI: 10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2021.181554. Disponível em: https://revistas.usp.br/rdg/pt_BR/article/view/181554. Acesso em: 29 mar. 2026.

SABOYA, Luciano Marcelo Falle *et al*. **Métodos das classificações climáticas de Thorntwaite e Köppen para Recife - PE, Brasil**. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar, [S. l.], v. 2, n. 8, e28575, 2021. DOI: https://doi.org/10.47820/recima21.v2i8.575. Disponível em: https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/575. Acesso em: 25 mar. 2026.

SILVA JÚNIOR, M. A. B. **Alternativas compensatórias para controle de alagamentos em localidade do Recife - PE**. 2015. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Recife, 2015.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2001. 943 p.

VILLA VERDE, Vanessa Gomes Rolim; SANTOS, Almany Costa. **Riscos geológicos urbanos nos morros da cidade de Recife – Pernambuco**. Revista de Geografia (Recife), [S. l.], v. 36, n. 3, p. 160-178, 2019.

ANÁLISE HIDRÁULICA DE UMA PONTE EM CANAL TRAPEZOIDAL SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE VAZÃO POR MEIO DO HEC-RAS

1 Rodrigo Girardon Della Pace, 2 Rutineia Tassi, 3 Leandro Conceição Pinto, 4 Gabriel Sulzbach Pereira, 5 Eliane Fischborn, 6 Camila Caballero Cristaldo, 7 Daniel Gustavo Allasia Piccilli e 8 Liriane Élen Böck

1 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail:rodrigodellapace02@gmail.com; 2 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: ruti@ufsm.br; 3 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail:leandro.pinto@ufsm.br; 4 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: gabrielpereirars@gmail.com; 5 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: eliane.fischborn@acad.ufsm.br; 6 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: camicaba2601@gmail.com; 7 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: dallasia@gmail.com; 8 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: liriane.bock@gmail.com.

Palavras-chave: ponte; modelagem hidráulica; HEC-RAS.

Resumo

As pontes desempenham função estratégica na infraestrutura viária, porém estão sujeitas a falhas associadas a eventos hidrológicos extremos, cuja frequência e intensidade tendem a aumentar de acordo com cenários de mudanças climáticas. O presente estudo analisou, por meio de modelagem 1D no HEC-RAS as condições hidráulicas do escoamento junto a uma ponte inserida em um trecho de rio de 5,0 km, sob diferentes condições de vazão (300 a 3.000 $m^3.s^{-1}$). As simulações consideraram vazões variáveis, em um total de 10 cenários, que representam desde condições de escoamento com baixa ocupação da seção hidráulica de passagem de cheia, até situações em que ocorre submersão da ponte. Foram utilizados indicadores como o nível da superfície da água, a velocidade média do escoamento e a folga hidráulica sob o tabuleiro (Eh), para avaliar as condições de funcionamento hidráulico. Os resultados indicaram que, ao longo da maior parte do trecho modelado, os parâmetros hidráulicos mantiveram comportamento praticamente uniforme ao longo do rio, com alterações concentradas na região da ponte. Para todas as vazões simuladas, os níveis da superfície da água a jusante da seção onde foi inserida a ponte permaneceram inferiores aos observados a montante, sendo essa diferença mais acentuada nas maiores vazões, quando o escoamento passou a interagir com o tabuleiro. Foram identificadas as vazões limites que permitem manter um *freeboard* de projeto (1,0 m), até o limite de 1.648 $m^3.s^{-1}$, no qual essa condição deixa de existir. A perda de qualquer zona livre de passagem aconteceu para 2.100 $m^3.s^{-1}$, quando o escoamento passou a atingir a superestrutura. Para 3.000 $m^3.s^{-1}$, observou-se galgamento. Além disso, as velocidades médias a jusante foram superiores às de montante em todas as simulações, com diferenças mais expressivas nas maiores vazões, indicando intensificação da contração hidráulica imposta pela estrutura. Os resultados evidenciam que o aumento da vazão compromete progressivamente o desempenho hidráulico da ponte, reduzindo a folga livre, elevando o nível d'água e intensificando as velocidades do escoamento, o que foi confirmado pela redução da área efetiva de escoamento de 29,86% em 2.100 $m^3.s^{-1}$ e de até 41,44% em 2.700 $m^3.s^{-1}$. Além disso, na maior vazão simulada, a velocidade média a jusante foi 38,99% superior à observada a montante, indicando intensificação da contração hidráulica e redução da margem de segurança da estrutura, reforçando a necessidade de considerar cenários hidrológicos mais críticos no planejamento e na avaliação de estruturas sujeitas a inundações.

Introdução

Classificadas como Obras de Arte Especiais (OAEs) (PAIXÃO; SILVA, 2024), as pontes são estruturas projetadas para vencer obstáculos que interrompem a continuidade de uma via, viabilizando a passagem sobre elementos naturais ou artificiais (LIZ; BARRA; MIKOWSKI, 2024). Essas estruturas exercem função estratégica na manutenção da mobilidade e da conexão entre diferentes regiões (FARIS; ZAYED; FARES, 2025), com reflexos diretos sobre a economia e a prestação de serviços públicos (KIM *et al*., 2017). Entretanto, a vida útil das pontes é comprometida pela exposição contínua a agentes ambientais, operacionais e mecânicos, condição que pode resultar em falhas estruturais, interrupções no tráfego e até perda de vidas humanas (WANG; LU; ZHAN, 2025). Falhas de projeto e execução (DENG; WANG; YU, 2015), falta de manutenção (ÇIFTÇIOĞLU; NASER, 2024), sobrecarga (VENTURA; BARABINO; MATERNINI, 2024), deterioração de materiais (COCA *et al*., 2011), e eventos extremos (KARRIQI *et al*., 2024) são as causas mais frequentes de colapso em pontes. Os eventos hidrológicos extremos (cheias e inundações) merecem destaque, pois podem comprometer a integridade das estruturas e a estabilidade das pontes, aumentando o risco de colapso (LOLI *et al*., 2022).

As inundações resultam do aumento da intensidade e da frequência das chuvas, associado ao aquecimento global, à elevação do nível do mar e à mudança de uso e ocupação da terra (RATHORE *et al*., 2025). Em consonância com esse cenário, as mudanças climáticas tendem a intensificar as chuvas extremas, aumentando a frequência e a severidade das inundações (KVOČKA; FALCONER; BRAY, 2016). Além disso, países em desenvolvimento, marcados por infraestrutura limitada e menor capacidade de resposta, são mais vulneráveis a desastres relacionados a inundações (MUNAWAR, 2020), como é o caso do Brasil, cuja diversidade geográfica e ampla rede fluvial ampliam a exposição a riscos hidrometeorológicos (MARENGO *et al*., 2021).

No Brasil, mais recentemente, a enchente extrema no Rio Grande do Sul, em 2024, impactou severamente as pontes: apenas nas principais rodovias estaduais e federais, 14 pontes precisaram ser reconstruídas, enquanto diversas outras, incluindo pontilhões, sofreram danos significativos (COLLISCHONN *et al*., 2025). Muitas dessas estruturas foram dimensionadas com base em pressupostos climáticos e hidrológicos históricos, cuja representatividade tem sido questionada diante das mudanças climáticas e da intensificação de eventos extremos (ALTAMIMI; FANG; AMLEH, 2026), o que reforça a necessidade de soluções mais resilientes (BIBI; REDDYTHTA; KEBEBEW, 2023). Além disso, mudanças nos padrões de precipitação podem alterar a frequência e a magnitude das cheias, modificando o comportamento das vazões extremas (SOUZA; REIS JUNIOR, 2022).

No caso de pontes, durante a passagem de cheias, o nível da água pode submergir parcial ou totalmente elementos estruturais, como fundações, pilares e tabuleiro (ARGYROUDIS; MITOULIS, 2021), comprometendo sua integridade. Isso ocorre tanto pelas ações hidrodinâmicas sobre os componentes submersos, quanto pela remoção de sedimentos ao redor das fundações, em razão das altas velocidades do escoamento, da turbulência e dos vórtices formados no local (HASANPOUR; ISTRATI; BUCKLE, 2021). Esses efeitos podem provocar danos parciais ou totais, levando à inutilização da estrutura, a depender da gravidade da falha (HABEEB; BASTIDAS-ARTEAGA, 2023).

Evidencia-se, portanto, a necessidade de adotar estratégias para mitigar riscos hidrológicos em pontes, destacando-se a modelagem hidráulica como ferramenta capaz de simular diferentes cenários de vazão e inundação, subsidiando projetos mais resilientes e apoiando a tomada de decisão (XIONG *et al*., 2023). Modelos hidrodinâmicos como HEC-RAS, MIKE, TELEMAC, Delft3D, LISFLOOD-FP e TUFLOW têm sido amplamente utilizados na análise da dinâmica do escoamento em rios e pontes (ARMAIN *et al*., 2021; TENG *et a*l., 2017). O HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*), especificamente, destaca-se pela ampla aplicação na simulação do escoamento em canais naturais e artificiais, especialmente em análises unidimensionais, devido à sua eficiência computacional e à capacidade de representar diferentes cenários hidráulicos (POPESCU; BĂRBULESCU, 2023). Sua aplicação abrange estudos de simulação de inundações, análise de risco hídrico, gestão de áreas alagáveis e modelagem fluvial, além da simulação de estruturas hidráulicas, como pontes e bueiros (HUO *et al*., 2023; LYN *et al*., 2024), contribuindo para a mitigação de impactos associados a eventos extremos (ZHANG; KHAING; LI, 2022).

Diante desse contexto, o presente trabalho apresenta uma análise realizada por meio do modelo hidráulico unidimensional (1D) HEC-RAS, a resposta hidráulica de uma ponte inserida em canal trapezoidal idealizado sob diferentes condições de vazão, avaliando as alterações no nível d'água, na velocidade do escoamento e na folga hidráulica da estrutura, considerando possíveis mudanças nos regimes hidrológicos associadas às mudanças climáticas.

Material e Métodos

A simulação hidráulica foi realizada no *software* HEC-RAS, versão 6.5, em abordagem unidimensional (1D) em regime permanente (*steady flow*). Foram simuladas 10 vazões distintas (300 m³/s, 600 m³/s, 900 m³/s, 1.200 m³/s, 1.500 m³/s, 1.800 m³/s, 2.100 m³/s, 2.400 m³/s, 2.700 m³/s e 3.000 m³/s), totalizando uma faixa ampla de análise, de modo a abranger desde níveis mais baixos até situações de submersão do tabuleiro da ponte (galgamento do tabuleiro). Essa abordagem é frequente em estudos de modelagem hidráulica, uma vez que vazões elevadas são particularmente relevantes para a avaliação do risco de inundação e da resiliência da infraestrutura (DAZZI *et al*., 2021).

Em condições de baixa vazão (sem interação com o tabuleiro da ponte), aplicou-se o método da Equação de Momento (*Momentum Equation*), pois permite representar explicitamente a geometria do pilar por meio da incorporação do coeficiente de arrasto (C_D). Para as condições de alta vazão (interação com o tabuleiro da ponte), utilizou-se o método de Pressão e Vertedouro (*Pressure and Weir Flow Method*), adequado para representar situações em que o tabuleiro e os aterros de acesso impõem obstrução significativa ao escoamento, com ocorrência de escoamento sob pressão e/ou sobre o tabuleiro.

Para a realização da simulação, foi adotada uma seção trapezoidal uniforme ao longo de todo o trecho de rio modelado, que tem 5,0 km. A seção foi determinada a partir de referências obtidas durante levantamentos batimétricos de campo em diferentes rios no estado do Rio Grande do Sul, por ocasião da cheia de 2024, especificamente, considerou-se as informações do rio Jaguari, localizado no estado do Rio Grande do Sul, entre os limites de drenagem dos municípios de São Vicente do Sul e São Francisco de Assis (Figura 01). As informações de geometria foram obtidas por meio de topobatimetria com Sistema Global de Navegação por Satélite com Correção em Tempo Real (GNSS RTK) e batimetria com Perfilador Acústico de Corrente Doppler (ADCP), amplamente utilizado em levantamentos batimétricos precisos e georreferenciados em ambientes fluviais (KASVI *et al*., 2019).

Justifica-se a escolha da geometria trapezoidal pois esta é uma forma simplificada de representar seções transversais frequentemente associadas a rios naturais (SAMARINAS; EVANGELIDES, 2021), sendo uma simplificação amplamente utilizada em modelagem hidráulica, especialmente devido ao alto custo e à dificuldade de obtenção de perfis batimétricos detalhados em rios extensos (JIANG; CHRISTENSEN; BAUER-GOTTWEIN, 2021).

Assim, a seção trapezoidal adotada apresenta fundo plano com largura de base de 65 m, largura de topo de 100 m e profundidade de 7,50 m, resultando em área livre de escoamento de 618,75 m². Os taludes laterais possuem inclinação aproximada de 2,3H:1V, além disso, foram consideradas planícies de inundação, permitindo representar o extravasamento lateral do escoamento em condições de cheia. Os parâmetros definidos para essa geometria trapezoidal foram obtidos a partir da média ponderada das seções transversais do rio tomado como referência.

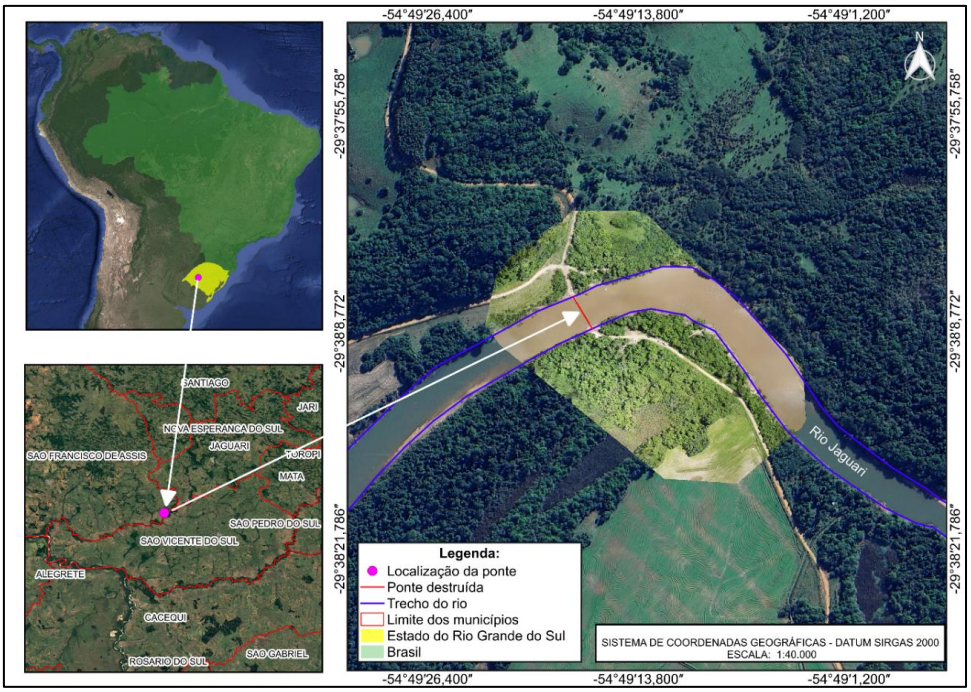


Figura 01: Localização do trecho do rio Jaguari adotado como referência para a geometria idealizada.
Fonte: Autores (2026)

A representação das seções transversais no HEC-RAS estabelece a digitalização manual da linha central do rio, das margens e das direções de escoamento, conforme as orientações do manual do modelo (USACE, 2023). As seções transversais utilizadas na análise são posicionadas nas extremidades a montante e a jusante do trecho modelado. A partir dessas seções, realizou-se a interpolação automática disponível no próprio modelo. As seções definidas foram posicionadas nas extremidades do trecho de 5 km a ser modelado (seção 4 e 1), e foi realizada interpolação regular entre elas, adotando-se distância média de 10 m entre as seções interpoladas. Nos trechos próximos à ponte, a seção a montante (seção 3) e a seção a jusante (seção 2) são inseridas próximas à estrutura, para analisar adequadamente os efeitos de contração e expansão do escoamento. A ponte é posicionada no centro do trecho modelado (2.500 m), permitindo analisar a resposta hidráulica a montante e a jusante sob diferentes condições de vazão. A Figura 02 apresenta, de forma esquemática, a configuração estrutural da ponte, incluindo o tabuleiro e os três pilares circulares inseridos na seção do canal.

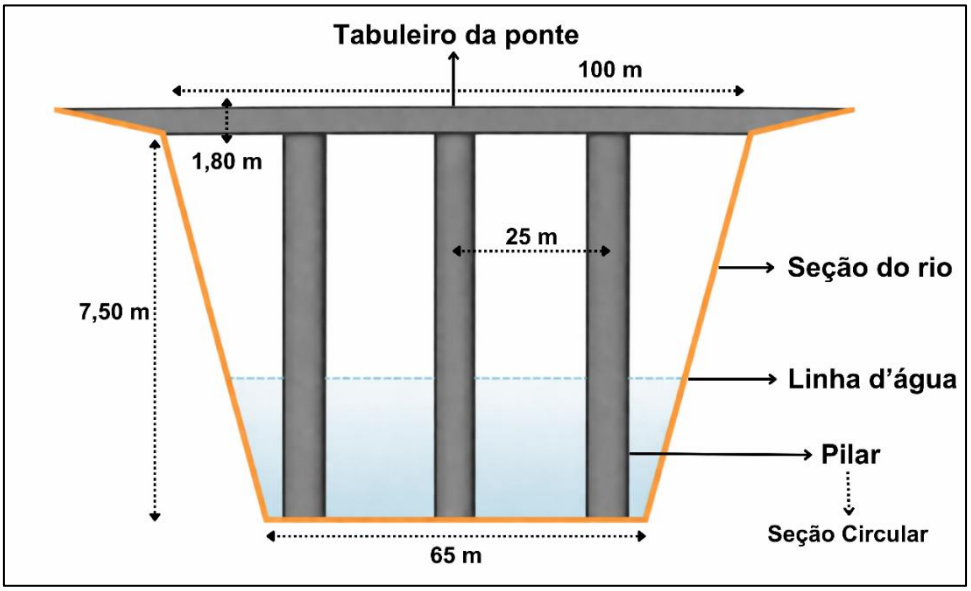


Figura 02: Configuração estrutural da ponte adotada na simulação.
Fonte: Autores (2026)

Foi adotado 1,80 m para a altura do tabuleiro, parâmetro que inclui a espessura da laje e a altura das vigas. A cota da face inferior do tabuleiro na seção de montante (seção 3) é de 205,01 m. A largura total do tabuleiro foi definida em 12,00 m, com base

na IS-113/21 do DAER-RS, que estabelece esse valor mínimo para OAEs em rodovias estaduais de Classe IA com pista dupla. Com relação aos pilares, usou-se uma configuração com três pilares circulares, alinhados em uma única seção transversal ao escoamento, com diâmetro frontal de 1,0 m e espaçamento de 25,0 m entre eixos. Para estes pilares circulares, no modelo, foi utilizado o coeficiente de arrasto (C_D) igual a 1,20, conforme recomendações do manual do HEC-RAS (USACE, 2023).

Os valores geométricos empregados para a ponte foram definidos com base em dimensões de projeto usualmente empregadas pelo Escritório Modelo de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), responsável por projetos de recuperação de pontes em diferentes municípios do estado do Rio Grande do Sul (informação obtida por meio de comunicação pessoal).

Para a avaliação hidráulica da ponte, adotou-se como critério a folga livre (*freeboard*) mínima de 1,0 m sob o tabuleiro, com base na orientação prática do Escritório Modelo de Engenharia Civil da UFSM para situações em que não há estudo hidrológico específico. Complementarmente, foi definido um indicador adimensional de eficiência hidráulica da ponte, calculado pela razão entre a folga disponível sob o intradorso e a folga mínima requerida de projeto, conforme Equação 01 abaixo.

$$Eh = \frac{Fd}{Freq} \qquad (01)$$

Onde: Eh é o indicador de eficiência hidráulica da ponte, Fd é a folga disponível entre o nível da água e a face inferior do tabuleiro da ponte e $Freq$ é a folga mínima requerida de projeto, adotada neste estudo como 1,0 m. Valores de $Eh \geq 1$ indicam atendimento ao critério mínimo de folga livre, enquanto valores de $Eh < 1$ indicam condição hidráulica insatisfatória em relação ao critério adotado.

Dentre os parâmetros usados no modelo, considerou-se uma declividade longitudinal do leito do rio (*S*) de 0,1%. As perdas de energia no escoamento foram representadas pelo coeficiente de rugosidade de Manning (n) e pelos coeficientes de contração (Cc) e expansão (Ce), com base nos valores recomendados pelo manual do HEC-RAS (USACE, 2023) e pela literatura (SECKIN; ATABAY, 2005; PRADHAN; PRADHAN; KHATUA, 2024). Para o canal principal, adotou-se *n* igual a 0,030, com base no trecho real do rio Jaguari, sendo um valor representativo de canais naturais principais, limpos e sem irregularidades acentuadas.

Nas seções do trecho do rio sem obstrução pela ponte, os coeficientes de contração e expansão foram considerados iguais a 0,0 e 0,0, respectivamente, uma vez que a geometria regular do canal não implica perdas localizadas. Por outro lado, nos trechos com presença da ponte, adotaram-se coeficientes de 0,3 para contração e 0,5 para expansão. Além disso, para representar a transição entre as seções sem ponte e a seção com presença da estrutura, adotou-se uma razão fixa de 1:2 entre os comprimentos dos trechos de contração e de expansão, respectivamente, conforme alternativa discutida por Seckin, Haktanir e Knight (2007). A Tabela 01 apresenta os parâmetros estruturais e hidráulicos adotados na simulação.

Grupo	Variável/Parâmetro	Configuração/Valor adotado
Ponte	Estrutura	Ponte com pilares
	Largura total (m)	12 (2 faixas)
	Altura do tabuleiro (m)	1,80
	Cota da face inferior do tabuleiro (m)	205,01
	Número de pilares	3
	Espaçamento entre pilares	25,0
	Diâmetro frontal dos pilares (m)	1,0
	Geometria dos pilares	Seção Circular
Canal	Geometria da seção	Trapezoidal
	Declividade (%)	0,10
	Rugosidade de Manning (*n*)	0,030
HEC-RAS	Regime de escoamento	Permanente
	Condição de escoamento	Misto
	Método de cálculo para baixo escoamento	Equação de Momento
	Método de cálculo para alto escoamento	Pressão e/ou Vertedouro
	Distância entre seções no rio (m)	10
	Faixa de vazão ($m^3.s^{-1}$)	300 - 3.000 (10 valores)
	Perdas localizadas no rio (contração/expansão)	0,0 e 0,0
	Perdas localizadas na ponte (contração/expansão)	0,3 e 0,5
	Trechos de contração/expansão (m)	40/80 (1:2)

Tabela 01: Parâmetros estruturais e hidráulicos adotados na simulação.
Fonte: Autores (2026)

Resultados e Discussão

De modo geral, os parâmetros hidráulicos apresentaram comportamento praticamente uniforme ao longo da maior parte do trecho modelado, em razão da geometria regular do canal trapezoidal. A principal alteração ocorreu na região da ponte, que modificou o nível da superfície e a velocidade da água nas seções adjacentes. Por esse motivo, a análise concentrou-se nas seções 3 e 2, localizadas imediatamente a montante e a jusante da estrutura.

A análise hidráulica indicou vulnerabilidade progressiva da estrutura com o aumento da vazão (Tabela 02). Em todas as vazões simuladas, os níveis da superfície da água a jusante permaneceram inferiores aos observados a montante, evidenciando efeito de remanso associado à presença da ponte. Esse comportamento está em concordância com estudos que apontam que pontes, ao atuarem como obstáculos hidráulicos, alteram o padrão do escoamento e intensificam processos turbulentos locais (PREGNOLATO *et al*., 2022). Nas menores vazões, essa diferença foi reduzida, variando entre 0,06 e 0,08 m, quando a interferência hidráulica esteve associada predominantemente aos pilares. Entretanto, nas maiores vazões, quando o escoamento passou a interagir diretamente com o tabuleiro, essa diferença aumentou para 0,85 m em 2.100 $m^3.s^{-1}$, atingindo 1,11 m nas vazões de 2.700 e 3.000 $m^3.s^{-1}$.

Em termos percentuais, o nível da água aumentou gradualmente entre os cenários simulados. Até 1.800 $m^3.s^{-1}$, os incrementos foram semelhantes entre montante e jusante, variando de 0,61% a 0,33%. O maior aumento ocorreu entre 1.800 e 2.100 $m^3.s^{-1}$, com incremento de 0,68% a montante e 0,30% a jusante, indicando maior represamento a montante nesse intervalo crítico. Após 2.100 $m^3.s^{-1}$, os aumentos percentuais foram menores. A montante, os incrementos foram de 0,26%, 0,27% e 0,14%, enquanto a jusante foram de 0,23%, 0,17% e 0,14%, respectivamente nos intervalos 2.100-2.400, 2.400-2.700 e 2.700-3.000 $m^3.s^{-1}$.

Vazão (m^3/s)	Nível da superfície da água (m)		Velocidade média do escoamento (m/s)		Δ Nível da superfície da água (%)		Δ Velocidade média do escoamento (%)		Redução área efetiva escoamento (%)	Intensidade contração hidráulica (%)	Eficiência hidráulica (*Eh*)
	Montante (seção 3)	Jusante (seção 2)	Montante (seção 3)	Jusante (seção 2)	Montante (seção 3)	Jusante (seção 2)	Montante (seção 3)	Jusante (seção 2)			
300	199,94	199,88	1,75	1,78	-	-	-	-	1,72	1,71	5,07
600	201,15	201,09	2,24	2,27	0,61	0,61	28,00	27,53	1,46	1,34	3,86
900	202,12	202,04	2,58	2,61	0,48	0,48	15,18	14,98	1,34	1,16	2,89
1.200	202,94	202,86	2,84	2,88	0,41	0,41	10,08	10,34	1,28	1,41	2,07
1.500	203,68	203,60	3,06	3,10	0,36	0,36	7,75	7,64	1,22	1,31	1,33
1.800	204,35	204,27	3,25	3,29	0,33	0,33	6,21	6,13	1,18	1,23	0,66
2.100	205,73	204,88	2,90	3,45	0,68	0,30	-10,77	4,86	29,86	18,97	-0,72
2.400	206,26	205,35	2,87	3,61	0,26	0,23	-1,03	4,64	35,81	25,78	-1,25
2.700	206,81	205,70	2,73	3,74	0,27	0,17	-4,88	3,60	41,44	37,00	-1,80
3.000	207,10	205,99	2,77	3,85	0,14	0,14	1,47	2,94	40,73	38,99	-2,09

Tabela 02: Resultados hidráulicos da ponte para as vazões simuladas.
Fonte: Autores (2026)

Considerando as cotas da face inferior do tabuleiro, verificou-se que a condição de vão livre sob a ponte foi mantida até a vazão de 1.800 m³/s. Por interpolação linear entre os cenários simulados de 1.800 e 2.100 m³/s, estimou-se que a perda dessa condição ocorreu em aproximadamente 1.943 m³/s, caracterizando a vazão de início de submersão do tabuleiro (Figura 3). Nesse intervalo, o acréscimo de 16,70% na vazão esteve associado à elevação de 1,38 m no nível d'água a montante, equivalente a incremento relativo de 0,68%, representando a transição entre escoamento em vão livre e contato direto com a estrutura.

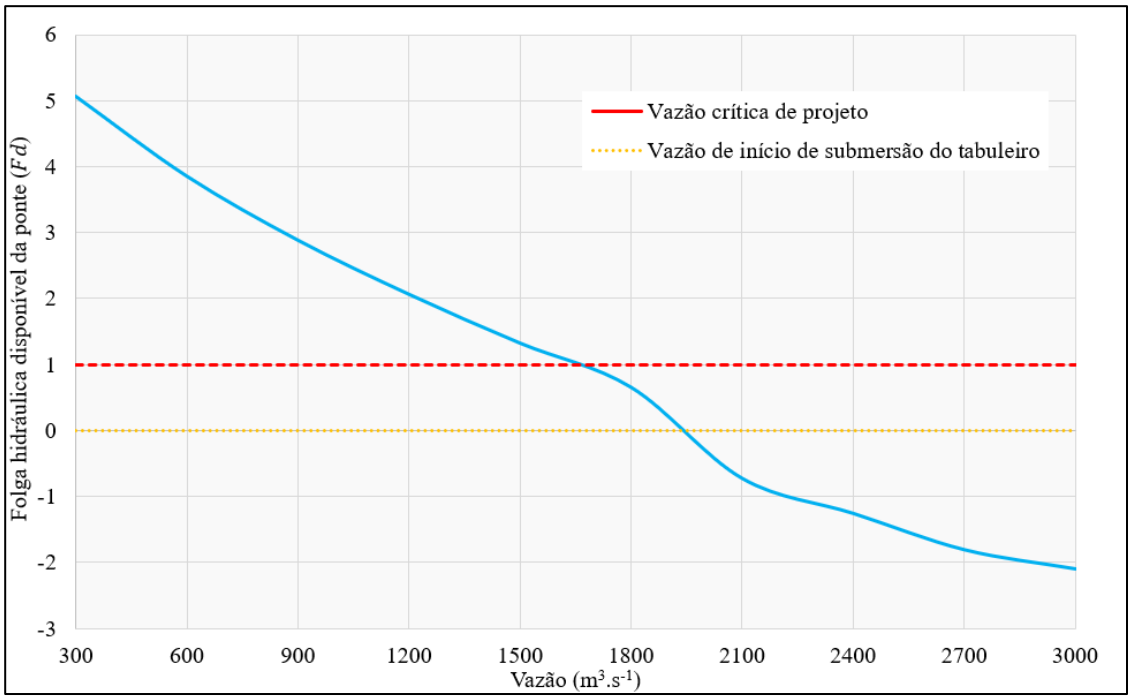


Figura 03: Folga hidráulica da ponte em função da vazão.
Fonte: Autores (2026)

Com base na folga hidráulica mínima adotada como critério de projeto (1,0 m), observou-se que as vazões de 300 a 1.500 m³/s atenderam à exigência estabelecida, com valores de $Eh \geq 1$. Nesse intervalo, o indicador de eficiência hidráulica decresceu de 5,07, em 300 m³/s, para 1,33, em 1.500 m³/s, indicando redução progressiva da margem de segurança, embora ainda em condição satisfatória. Para 1.800 m³/s, embora o escoamento ainda ocorresse em vão livre, a folga disponível reduziu-se para 0,66 m, resultando em $Eh = 0{,}66$, o que caracteriza condição hidráulica insatisfatória em relação ao critério mínimo. A partir de 2.100 m³/s, a folga tornou-se negativa e os valores de Eh também passaram a ser negativos, evidenciando o contato da lâmina d'água com a face inferior do tabuleiro e o início da submersão do tabuleiro. Em 3.000 m³/s, verificou-se o galgamento da ponte, com ultrapassagem da cota superior da estrutura.

O aumento da vazão também resultou em aceleração progressiva do escoamento na região da ponte. Em todas as simulações, as velocidades médias a jusante foram superiores às observadas a montante, indicando aceleração do escoamento após a passagem pela estrutura. Esse comportamento é coerente com a redução da área efetiva de escoamento imposta pelos pilares e, nas maiores vazões, também pela interação do escoamento com o tabuleiro (GHOBADIAN; BASIRI; TABAR, 2018).

Entre 300 e 1.800 $m^3.s^{-1}$, os incrementos percentuais de velocidade foram positivos em ambas as seções. A montante, os aumentos sucessivos foram de 28,00%, 15,18%, 10,08%, 7,75% e 6,21%, enquanto a jusante foram de 27,53%, 14,98%, 10,34%, 7,64% e 6,13%, evidenciando crescimento gradual da velocidade com a elevação da vazão.

A partir de 2.100 $m^3.s^{-1}$, observou-se mudança no comportamento hidráulico. A jusante, os incrementos percentuais permaneceram positivos, com valores de 4,86%, 4,64%, 3,60% e 2,94% entre os cenários sucessivos, indicando continuidade da aceleração do escoamento. Em contraste, a montante os incrementos tornaram-se negativos entre 2.100 e 2.700 $m^3.s^{-1}$, com valores de -10,77%, -1,03% e -4,88%, refletindo redução da velocidade média nessa seção em razão do efeito de remanso e da interação do escoamento com a face inferior do tabuleiro. Na vazão de 3.000 $m^3.s^{-1}$, quando ocorreu o galgamento da ponte, o incremento percentual da velocidade a montante voltou a ser positivo (1,47%), sugerindo alteração no regime de escoamento após a ultrapassagem da estrutura pela lâmina d'água.

A redução da área efetiva de escoamento foi baixa entre 300 e 1.800 $m^3.s^{-1}$, variando de 1,72% a 1,18%, indicando pequena interferência da ponte na seção de passagem. A partir de 2.100 $m^3.s^{-1}$, esse comportamento se alterou de forma expressiva, com redução de 29,86%, aumentando para 35,81% em 2.400 $m^3.s^{-1}$e atingindo 41,44% em 2.700 $m^3.s^{-1}$. A intensidade da contração hidráulica apresentou comportamento semelhante. Até 1.800 $m^3.s^{-1}$, manteve-se entre 1,16% e 1,71%. A partir de 2.100 $m^3.s^{-1}$, aumentou para 18,97%, alcançando 38,99% em 3.000 $m^3.s^{-1}$, indicando intensificação da contração hidráulica nas maiores vazões, especialmente após o contato do escoamento com o tabuleiro.

Considerações Finais

Os resultados demonstraram que o aumento da vazão influencia diretamente o comportamento hidráulico da ponte, promovendo elevação do nível da superfície da água, redução da folga sob o tabuleiro e alteração das velocidades do escoamento, especialmente a jusante da estrutura. Para vazões até 1.500 m³/s, a ponte atendeu à folga hidráulica mínima de 1,0 m. A partir de 1.800 m³/s, essa condição deixou de ser atendida, embora o escoamento ainda ocorresse em vão livre.

A análise quantitativa permitiu identificar limiares operacionais relevantes. A vazão limite de atendimento ao *freeboard* de projeto foi estimada em aproximadamente 1.648 m³/s, enquanto a vazão de início de submersão da face inferior do tabuleiro ocorreu em torno de 1.943 m³/s. Assim, a faixa entre 1.800 e 2.100 m³/s representou a transição mais crítica do sistema, marcada pela perda da folga mínima, pelo início do contato do escoamento com o tabuleiro e por mudanças expressivas no comportamento hidráulico.

Os indicadores derivados reforçaram essa interpretação. A redução da área efetiva de escoamento passou de valores inferiores a 1,72% nas menores vazões para 29,86% em 2.100 m³/s, atingindo 41,44% em 2.700 m³/s. Além disso, na maior vazão simulada, a velocidade média a jusante foi 38,99% superior à observada a montante, evidenciando intensificação da contração hidráulica e possível aumento da suscetibilidade a processos erosivos locais.

Embora a análise tenha sido realizada em canal trapezoidal regular, determinado a partir de uma seção real de rio, e sob regime permanente, os resultados evidenciam tendências hidráulicas relevantes para situações de cheia. Dessa forma, o estudo reforça a importância de considerar cenários hidrológicos mais severos no planejamento, no dimensionamento e na avaliação de pontes sujeitas a eventos extremos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ao Centro de Tecnologia, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), à CAPES e ao grupo de pesquisa em Modelagem HidroAmbiental e Ecotecnologias pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho. Os autores também agradecem ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa concedida à autora Rutineia Tassi, por meio do processo nº 310073/2025-1.

Referências Bibliográficas

ALTAMIMI, S.; FANG, L.; AMLEH, L. Identifying climatic hazard importance factors for bridges using expert-based fuzzy analytic hierarchy process. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, Amsterdam, v. 133, p. 105971, dez. 2026.

ARGYROUDIS, S. A.; MITOULIS, S. A. Vulnerability of bridges to individual and multiple hazards: floods and earthquakes. **Reliability Engineering and System Safety**, Oxford, v. 210, p. 107564, fev. 2021.

ARMAIN, M. Z. S. *et al*. Hydrodynamic modelling of historical flood event using one dimensional HEC-RAS in Kelantan basin, Malaysia. *In*: International Conference on Civil and Environmental Engineering, 2021.

BIBI, T. S.; REDDYTHTA, D.; KEBEBEW, A. S. Assessment of the drainage systems performance in response to future scenarios and flood mitigation measures using stormwater management model. **City and Environment Interactions**, Amsterdam, v. 19, p. 100111, jun. 2023.

COCA, F. J. O. *et al*. Corrosion fatigue of road bridges: a review. **International Journal of Electrochemical Science**, Belgrade, v. 6, p. 3438-3451, ago. 2011.

COLLISCHONN, W. *et al*. The exceptional hydrological disaster of April-May 2024 in southern Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 30, mar. 2025.

ÇIFTÇIOĞLU, A. Ö.; NASER, M. Z. Identifying and estimating causal effects of bridge failures from observational data. **Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience**, Amsterdam, v. 3, p. 100068, dez. 2024.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. **Instruções de serviço para projetos finais de engenharia**. Porto Alegre: DAER-RS, 2021.

DAZZI, S. *et al*. Comparison of two modelling strategies for 2D large-scale flood simulations. **Environmental Modelling & Software**, Oxford, v. 146, p. 105225, dez. 2021.

DENG, L.; WANG, W.; YU, Y. State-of-the-art review on the causes and mechanisms of bridge collapse. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, Reston, v. 29, n. 1, p. 04015005, jan. 2015.

FARIS, N.; ZAYED, T.; FARES, A. Review of condition rating and deterioration modeling approaches for concrete bridges. **Buildings**, Basel, v. 15, p. 219, jan. 2025.

GHOBADIAN, R.; BASIRI, M.; TABAR, Z; S. Interaction between channel junction and bridge pier on flow characteristics. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, p. 2787-2795, 2018.

HABEEB, B.; BASTIDAS-ARTEAGA, E. Assessment of the impact of climate change and flooding on bridges and surrounding area. **Frontiers in Built Environment**, Lausanne, p. 1268304, set. 2023.

HASANPOUR, A.; ISTRATI, D.; BUCKLE, I. Coupled SPH-FEM modeling of tsunami-borne large debris flow and impact on coastal structures. **Journal of Marine Science and Engineering**, Basel, v. 9, p. 1068, out. 2021.

HUO, L. *et al*. Revelation and projection of historic and future precipitation characteristics in the Haihe River Basin, China. **Water**, Basel, v. 15, n. 18, p. 3245, set. 2023.

JIANG, L.; CHRISTENSEN, S. W.; BAUER-GOTTWEIN, P. Calibrating 1D hydrodynamic river models in the absence of cross-section geometry using satellite observations of water surface elevation and river width. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 25, p. 6359-6379, dez. 2021.

KARRIQI, T. *et al*. Bridge assessment under earthquake and flood-induced scour. **Applied Sciences**, Basel, v. 14, p. 5174, jun. 2024.

KASVI, E. *et al*. Comparison of remote sensing based approaches for mapping bathymetry of shallow, clear water rivers. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 333, p. 180-197, mar. 2019.

KIM, H. *et al*. Flood fragility analysis for bridges with multiple failure modes. **Advances in Mechanical Engineering**, London, v. 9, n. 3, p. 1-11, mar. 2017.

KVOČKA, D.; FALCONER, R. A.; BRAY, M. Flood hazard assessment for extreme flood events. **Natural Hazards**, Dordrecht, v. 84, p. 1569-1599, jul. 2016.

LIZ, J. V.; BARRA, B. S.; MIKOWSKI, A. Análise da produção científica brasileira acerca de pontes de concreto, madeira e metálica. **Revista Brasileira de Engenharia de Estruturas**, Araraquara, v. 27, n. 2, p. 102, ago. 2024.

LOLI, M. *et al*. Flood characterization based on forensic analysis of bridge collapse using UAV reconnaissance and CFD simulations. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 822, p. 153661, fev. 2022.

LYN, D. A. *et al*. Culvert versus bridge hydraulics for larger-span or short culverts. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 150, n. 2, p. 04024002, fev. 2024.

MARENGO, J. A. *et al*. Extreme rainfall and hydro-geo-meteorological disaster risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C global warming scenarios: An analysis for Brazil. **Frontiers in Climate**, Lausanne, v. 3, p. 610433, 2021.

MUNAWAR, H. S. Flood disaster management: Risks, technologies, and future directions. **Image Processing, Concepts, Methodologies and Applications**, Hoboken, p. 115-146, 2020.

PAIXÃO, D. L.; SILVA, M. F. E. Estimativa das cotas e vazões máximas em projetos de pontes utilizando o HEC-HMS. *In*: II FluHidros e XVI ENES, 1., 2024, Salvador.

POPESCU, C.; BĂRBULESCU, A. Floods simulation on the Vedea River (Romania) using hydraulic modeling and GIS software: A case study. **Water**, Amsterdam, v. 15, p. 483, 2023.

PREGNOLATO, M.; WINTER, A. O.; MASCARENAS, D.; SEN, A. D.; BATES, P.; MOTLEY, M. R. Assessing flooding impact to riverine bridges: an integrated analysis. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 22, p. 1559-1576, 2022.

RATHORE, J. *et al*. 2024 Brazil floods: Mapping the extent and impacts in Eastern Rio Grande do Sul using geospatial techniques. **Natural Hazards Research**, v. 5, p. 851-861, mar. 2025.

SAMARINAS, N.; EVANGELIDES, C. Discharge estimation for trapezoidal open channels applying fuzzy transformation method to a flow equation. **Water Supply**, London, v. 21, n. 6, p. 2893, 2021.

SECKIN, G.; HAKTANIR, T.; KNIGHT, D. W. A simple method for estimating flood flow around bridges. **Water Management**, London, v. 160, p. 195-202, 2007.

SOUZA, S. A. de; REIS, JR., D. S. Trend Detection in Annual Streamflow Extremes in Brazil. **Water**, Basel, v. 14, p. 1805, jun. 2022.

TENG, J. *et al*. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling & Software**, Oxford, v. 90, p. 201-216, abr. 2017.

U.S. Army Corps of Engineers. HEC-RAS User's Manual, Version 6.4. **Hydrologic Engineering Center**, 2023.
VENTURA, R.; BARABINO, B.; MATERNINI, G. Estimating the frequency of traffic overloading on road bridges. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, Beijing, v. 11, n. 4, p. 776-796, ago. 2024.

WANG, H.; LU, W.; ZHAN, W. Dynamic response and damage mechanism of reinforced concrete beam bridges under rockfall impacts. **Scientific Reports**, London, v. 15, p. 5090, fev. 2025.

ZHANG, Ke; KHAING, Zaw Myo; LI, Zhijia. **Remote sensing mapping and modeling for flood hazards in data-scarce areas: a case study in Nyaungdon Area**, Myanmar. 1. ed. Hoboken: Wiley-AGU, 2022.

MODELAGEM DE SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA USANDO REALIDADE AUMENTADA APLICADA À GESTÃO DE RISCO DE INUNDAÇÕES, ENCHENTES E ALAGAMENTOS

1 Ana Gabrielle Sena Almeida, 2 Adenilson Costa de Oliveira, 3 Alan Cavalcanti da Cunha
1 Universidade Federal do Amapá, e-mail: anagabi.sena18@gmail.com; 2 Universidade Federal do Amapá, e-mail: adcivil@unifap.br; 3 Universidade Federal do Amapá, e-mail: alancunha@unifap.br

Palavras-chave: Sandbox; Planejamento Urbano; Vulnerabilidade Hidrológica.

Resumo

A realidade aumentada (RA) é considerada uma ferramenta tecnológica avançada e inovadora, com capacidade de representar superfícies e analisar problemas de engenharia que envolvam interação topografia-escoamento livre. Destaque é dado à investigação de eventos hidrológicos extremos em cidades sob impacto de enchentes, inundações e alagamentos, que impactam com frequência progressiva a economia, o patrimônio e vidas humanas. O objetivo da investigação é analisar o uso e a aplicação da RA não só como metodologia inovadora na resolução de problemas complexos de engenharia, mas também como suporte ao ensino, pesquisa e extensão, destacando-se sua potencialidade tecnológica na avaliação espacial de superfícies topográficas integradas aos fenômenos de escoamento superficiais. Isto é, promovendo um diferencial interativo e de visualização 3D desses fenômenos hídricos em tempo quase real. A metodologia de investigação se dividiu nas seguintes etapas: 1) revisão da literatura referente ao uso da Caixa de Areia em RA, mostrando o potencial de aplicação em cenários realísticos em bacias hidrográficas, especialmente aquelas pouco estudadas da Amazônia; 2) Instalação do protótipo Caixa de Areia em RA; 3) modelagem e simulação de superfícies topográficas 3D, com escoamentos superficiais em tempo quase real e análise de cenários de enchentes, inundações e alagamentos, para um estudo de caso no contexto amazônico. O principal resultado da aplicação da Caixa de Areia em RA são os cenários realísticos de interação superfície-escoamento como recurso didático e inovador, capaz de auxiliar na visualização 3D, favorecendo o desenvolvimento do raciocínio espacial em disciplinas integradas de engenharia, embora ainda pouco difundida e conhecida. Como conclusão, observamos que a metodologia apresenta significativo potencial em análises complexas, que podem apresentar relevância em "salas de situação ou operações de defesa civil", especialmente no enfrentamento ou simulações preventivas de desastres naturais. Portanto, a ferramenta é considerada atrativa e de fácil interação com usuários, facilitando o processo de comunicação, extrapolando a simples aplicação de ensino, pesquisa e extensão.

Introdução

A representação de superfícies utilizando técnicas inerentes à topografia é essencial para a análise dos relevos, servindo como suporte à produção de dados relevantes no planejamento, controle e execução de intervenções de engenharia no espaço urbano e rural. No presente caso, destacaremos as interações destas superfícies com potenciais eventos hidrológicos extremos (MIGUEZ et al., 2018). A relevância do tema está na compreensão dos impactos envolvendo fenômenos hidroclimáticos de grandes proporções nas infraestruturas urbanas das cidades. Em especial na vida socioeconômica das populações, no saneamento básico e no meio ambiente em geral.

Além disso, simulações de cenários de impactos de enchentes, inundações e alagamentos representam uma oportunidade de análise prévia dos riscos socioambientais sobre as populações mais vulneráveis potencialmente afetadas (CUNHA e OLIVEIRA, 2024). Assim, é possível destacar sua importância cada vez mais atual, considerando efeitos catastróficos devido a ocorrência desses eventos extremos que provocam danos e sinistros em todo o território brasileiro, em especial em zonas urbanas da Amazônia (PACHECO et al., 2023; SOUSA et al., 2023; SOUZA et al., 2024).

A representação de superfícies deve, portanto, estar alinhada com uma boa compreensão das formas espaciais de relevo e dos elementos da topografia no geral (NRC, 2006). No entanto, tem sido observado que no ensino de engenharia os estudantes enfrentam dificuldades para compreender a definição dos relevos apresentados em plantas topográficas. Por exemplo, a representação de superfícies em "curvas de nível" contribui para a análise do relevo com visualização em 2D. Com o uso da ferramenta de modelos virtuais como o GeoWall, há a possibilidade de interação dos alunos com a superfícies sob variados ângulos, contribuindo para o aprendizado (CAUDELL et al., 1992; KAWAMOTO et al., 2016; CUNHA e OLIVEIRA, 2024; ALMEIDA, 2023 e KREYLOS, 2023). Nesse sentido, outra ferramenta de grande relevância para o estudo e a compreensão das geociências é a Realidade Aumentada (RA), que, apesar de pouco utilizada em comparação às ferramentas de modelos virtuais, apresenta excelentes potencialidades de aplicações inovadoras nas áreas de engenharia. No presente estudo, destacamos as análises de riscos de desastres hidrológicos, desenvolvida especificamente para representar e explorar estruturas e processos tridimensionais, também muito comuns nas geociências (relevo, superfícies topográficas, volumes, camadas geológicas, dinâmica ambiental) (MIGUEZ et al., 2018).

Dessa forma, a análise de superfícies topográficas por meio da RA apresenta aplicações tanto no âmbito didático quanto na pesquisa básica e aplicada, configurando-se como uma ferramenta valiosa para o estudo de diferentes cenários topográficos. CAUDELL et al., (1992) cunharam o termo "Realidade Aumentada" para descrever a sobreposição de informações desenvolvidas e apresentadas por computador no mundo real. A Caixa de Areia de Realidade Aumentada (SARndbox) foi

inicialmente desenvolvida na Universidade da Califórnia Davis em parceria com o Centro de Pesquisa Ambiental de Tahoe e com colaboração do Aquário e Centro de Ciências ECHO Lake (BRAZ; MEZZOMO; KAWAMOTO, 2019). Trata-se de um projeto que permite a criação, em tempo real, de superfícies topográficas com representação 3D e curvas de níveis interativas, permitindo ao usuário uma experiência imersiva na utilização da tecnologia. A Sandbox é formada, resumidamente, por uma caixa de areia onde a superfície a ser representada é modelada, um sensor de movimento e profundidade que capta as alterações na areia, um projetor digital que reproduz a imagem gerada pelo computador, e um *software* de processamento de mapas topográficos (KAWAMOTO et al., 2016). Esses dispositivos, em conjunto, viabilizam a criação de topografias em projeção 3D hipsométrica sobre a areia. Em síntese, a ferramenta complementa a compreensão da superfície representada em 2D, fornecendo ao usuário uma interação 3D e em tempo real (Figura 01a, b).

A Sandbox é capaz de simular o escoamento superficial da água de forma virtual à medida que o relevo é moldado na areia, o que possibilita a visualização de cenários envolvendo enchentes, alagamentos, inundações, entre outros (ALMEIDA, 2023 e KREYLOS, 2023) (Figura 01a, b). Nesse contexto, essa aplicação apresenta elevado potencial para a análise de situações reais de eventos hidrológicos extremos, especialmente na Amazônia, onde as bacias hidrográficas são pouco conhecidas hidrologicamente. Destaca-se, no presente estudo, a contribuição da RA para a análise de topografias previamente estudadas em áreas historicamente afetadas por eventos de inundação no Estado do Amapá. Esse fato permitiu uma compreensão mais abrangente da dinâmica hidrológica, subsidiando tomadas de decisão em projetos de planejamento urbano e aplicação de conhecimento interativo superfície-escoamento atinentes à engenharia.

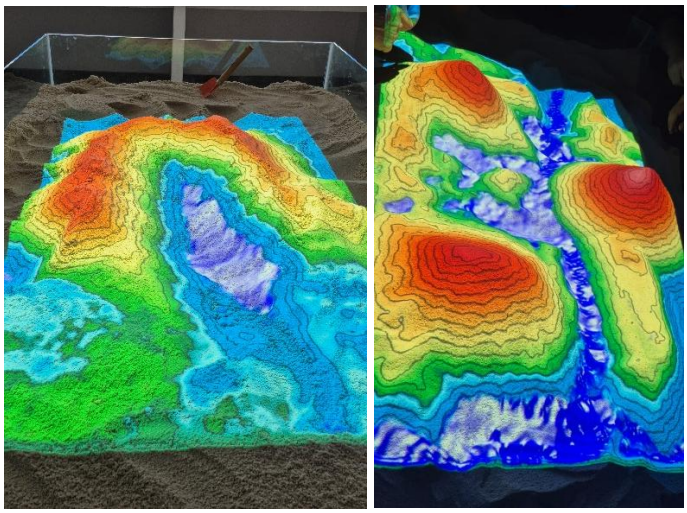


Figura 01: a) Sandbox de Realidade Aumentada em operação no Laboratório de Engenharia Civil da UNIFAP; b) Aula da disciplina de Topografia utilizando a Sandbox como ferramenta de suporte ao ensino.
Fonte: Autores (2026)

Nesse contexto, o estudo em questão tem como objetivo desenvolver um protótipo da tecnologia Sandbox no Laboratório de Engenharia Civil da UNIFAP e aplicá-lo no estudo e análise de eventos hidrológicos extremos em cidades da Amazônia. O estudo concentra-se no Estado do Amapá, com ênfase nas deficiências do saneamento básico, especialmente no eixo de drenagem urbana, que influencia diretamente a ocorrência de inundações e alagamentos (SOUSA et al., 2023; PACHECO et al., 2023). Desse modo, a tecnologia foi utilizada para simular o escoamento superficial da água por meio de eventos de precipitação, favorecendo a análise e a compreensão dessas problemáticas. Destaca-se que foi realizada a simulação de um evento hidrológico real utilizando o mapa topográfico do município de Ferreira Gomes/AP (CUNHA et al., 2026), permitindo a aplicação prática da ferramenta Sandbox em um cenário também realístico. O sistema possibilitou a avaliação do comportamento hidrológico em diferentes cenários de relevo e do uso do solo, auxiliando na identificação de áreas mais vulneráveis ou suscetíveis a alagamentos, enchentes e inundações. A ferramenta foi capaz de fornecer subsídios para o planejamento de medidas mitigadoras e aprimorar potenciais intervenções em projetos de drenagem urbana, especialmente no âmbito do saneamento básico e de defesa civil.

Material e Métodos

Para o desenvolvimento construtivo da caixa de areia (Sandbox) e sua aplicação em realidade aumentada, utilizou-se como referência o manual de Kawamoto (2016), com a incorporação de algumas inovações e adaptações. Destaca-se, o uso do Guia de Confecção e Aplicações para Ensino de Milantoni (2021) como uma referência adicional.

A operação da Sandbox demandou configurações mínimas de *hardware*: um computador com placa gráfica dedicada (offboard), executando Sistema Operacional Linux; um sensor de profundidade Microsoft Kinect 1.0 — no protótipo SARndbox UNIFAP foi utilizado o modelo Kinect para Xbox 1414, de primeira geração, compatível com o *software* utilizado pela ARS (Kinect 3D Video Package); um projetor digital de dados com uma interface de vídeo digital; e uma caixa de areia equipada com suportes específicos para a instalação do sensor Kinect e do projetor (KAWAMOTO et al., 2016).

A estrutura da caixa de areia em RA apresenta dimensões superiores às indicadas no manual adotado, conforme apresentado na Tabela 01. Tal modificação foi incorporada com o objetivo de ampliar a versatilidade do equipamento, potencializando suas possibilidades de aplicação e utilização, especialmente no ensino, extensão e popularização da ciência.

Dimensões	Manual Kawamoto (2016)	Sandbox UNIFAP (2026)
Largura (m)	0,75	1,00
Comprimento (m)	1,00	1,80

Tabela 01: Dimensões da Sandbox.
Fonte: Autores (2026)

Optou-se pela utilização de uma caixa com proporção 5:9, em contraste com a proporção 4:3 descrita na literatura de referência. Essa alteração justifica-se pelo maior potencial de aplicação proporcionado pelas dimensões ampliadas do equipamento, principalmente em relação às dimensões físicas disponíveis para a movimentação e modelagem da areia. No que se refere à estrutura da caixa, adotou-se uma placa de MDF para a base e laterais em vidro temperado, cada uma com 20,00 cm de altura (Figura 2a), unidas por meio de cola de aquário (silicone). A estrutura de suporte foi confeccionada em aço do tipo metalon, com união dos elementos realizada por meio de soldagem em filete. Na base do suporte foram incorporadas rodas, a fim de possibilitar a movimentação da caixa de acordo com a necessidade do usuário.

Para o suporte do sensor Kinect e do projetor digital de dados, adotou-se uma estrutura fixa acoplada a uma das vigas do Laboratório de Engenharia Civil, também confeccionada em aço metalon soldado (Figura 2b). Esse suporte possibilita a movimentação do sensor e do "data show", facilitando a calibragem e adequação do modelo em diferentes condições de uso. Dessa forma, a estrutura da caixa e a dos demais equipamentos configuram-se como duas unidades independentes.



Figura 02: a) Estrutura da caixa de areia e do suporte; b) Suporte do sensor Kinect e do projetor digital de dados.
Fonte: Autores (2025; 2026)

Embora tenha sido adotada uma caixa na proporção 5:9, a imagem projetada sobre a superfície da areia apresenta proporção 4:3, correspondente ao campo de visão da câmera do Kinect e compatível com a área de cobertura do projetor de dados. Destaca-se, ainda, que a resolução total do sistema é limitada pela câmera do Kinect, uma vez que esta possui a menor especificação de pixels (640 × 480) em comparação ao projetor (1024 × 768) (KAWAMOTO et al., 2016).

Segundo a Tabela 01, a Sandbox UNIFAP apresenta menor dimensão de 1,00 m, em contraste com o protótipo desenvolvido por Kawamoto (2016) – consoante a recomendação dos desenvolvedores (KREYLOS, 2023) – o qual possui 0,75 m como menor dimensão. Essa alteração dimensional possibilitou a ampliação da área projetada para aproximadamente 1,13 m × 0,85 m, mantendo a razão de aspecto 4:3 enquanto amplia a área útil de representação e modelagem do terreno.

A caixa de areia foi preenchida com uma camada de material granular com profundidade variando entre 4 cm e 10 cm. No protótipo, foi utilizada areia de construção previamente peneirada [0,42 mm ≤ ϕ ≤ 2,0 mm], garantindo maior uniformidade granulométrica e melhor desempenho na modelagem da superfície.

A aplicação da Sandbox tem sido utilizada em análises de impactos de inundações nos sistemas de drenagem em município do Estado do Amapá (Projeto TedPlan) (Cunha et al., 2026), com destaque à representação da topografia do município de Ferreira Gomes/AP. Neste caso, foi elaborada uma maquete física correspondente à região situada às margens do rio Araguari (ortomosaicos obtidos por sensor de um drone). A delimitação da área de estudo fundamentou-se na versão preliminar do Diagnóstico Técnico-Participativo de Ferreira Gomes do Plano Municipal de Saneamento Básico (CUNHA et al., 2026), na qual identificamos previamente as áreas suscetíveis a alagamentos e inundações no município. Dessa forma, a modelagem topográfica concentrou-se nos bairros Centro e Matadouro (Figura 03), localizados às margens do rio Araguari, por apresentarem maior vulnerabilidade a esses eventos, uma vez que se inserem em zonas classificadas com níveis de risco intermediário e elevado (CUNHA et al., 2026).

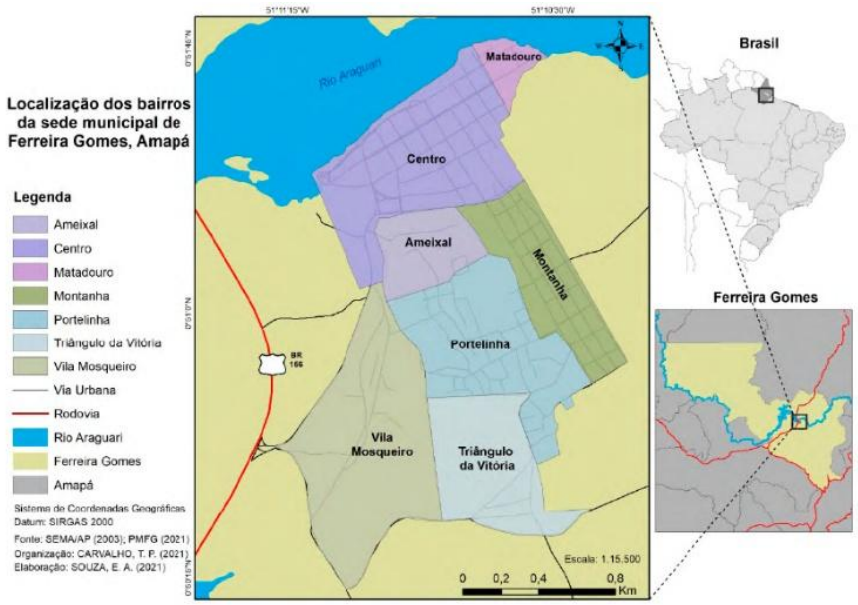


Figura 02: Mapa dos bairros de maior vulnerabilidade às inundações, enchentes e alagamentos de Ferreira Gomes/AP. Fonte: CARVALHO (2023)

O mapa topográfico da região modelada na Sandbox foi disponibilizado pelo projeto Tedplan (CUNHA, et al.,2026), sendo posteriormente submetido a adaptações para viabilizar sua reprodução em maquete física. A definição dos intervalos altimétricos foi realizada com o auxílio do *software* Autodesk Civil 3D, a partir do qual foi gerado o mapa de elevações utilizado como base para a confecção da maquete física. Adotou-se um intervalo altimétrico constante de 4,80 m entre as faixas de cores (Figura 03), de modo a garantir melhor legibilidade da variação do relevo e compatibilidade com a representação visual do sistema.

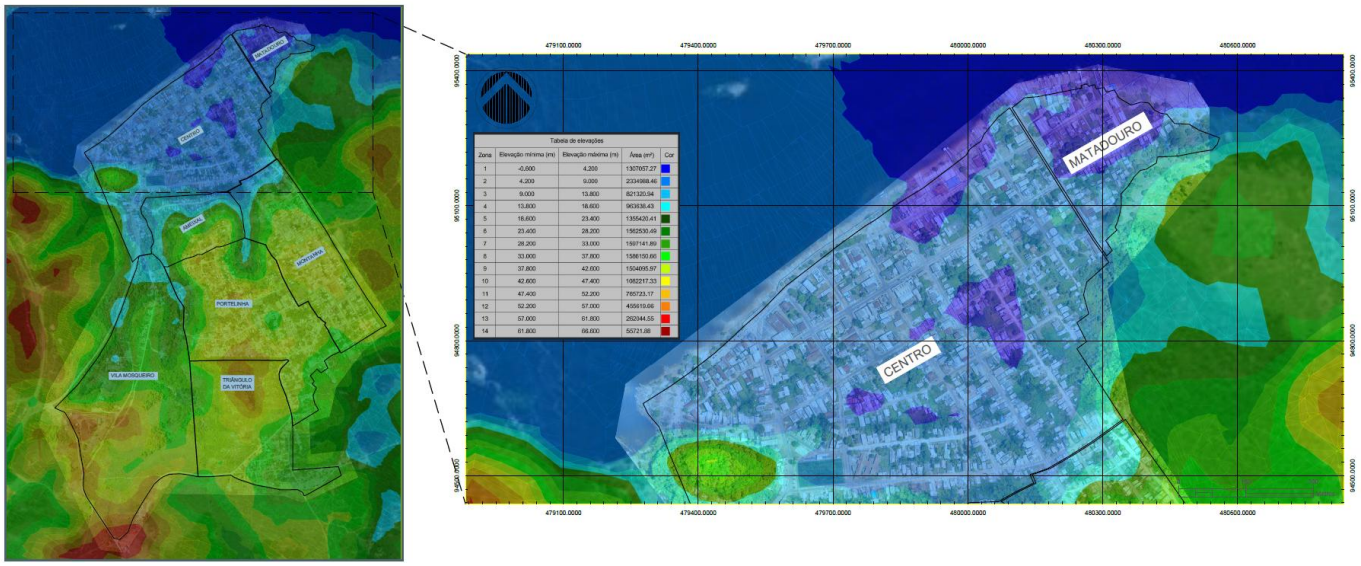


Figura 03: Mapa topográfico de elevações dos bairros Centro e Matadouro de Ferreira Gomes/AP. Fonte: Modificado de CUNHA et al. (2026)

A maquete física foi confeccionada em placas de poliestireno (isopor) de 0,50 cm de espessura, sendo utilizadas 12 camadas, resultando em uma altura total de 6,00 cm. As dimensões em planta foram condicionadas ao tamanho da própria chapa de isopor, de 1,00 m × 0,50 m. A partir dessas definições, obteve-se uma escala vertical de 1:960 e uma escala horizontal de 1:2000.

A metodologia adotada para a confecção da maquete baseou-se na oficina de maquete de relevo proposta por Sousa (2014), com adaptações e simplificações quanto aos materiais empregados (Tabela 02). O mapa topográfico de elevações foi transferido para as placas de poliestireno (isopor), orientando o recorte e a sobreposição das camadas. Destaca-se que a área correspondente ao rio Araguari foi suprimida no modelo físico, mantendo-se apenas a representação do relevo da área urbana.

Quantidade	Material
10	Placa de poliestireno (isopor), medindo 1,00m x 0,50m e 0,50cm de espessura
01	Agulha
01	Estilete
01	Cola de poliestireno (isopor)
01	Vela de parafina
01	Isqueiro
01	Fita crepe
01	Lixa de unha

Tabela 02: Materiais utilizados na confecção da maquete física de poliestireno.
Fonte: Autores (2026)

Após a confecção da maquete física a partir do mapa de elevações e dos materiais especificados, o modelo foi incorporado ao protótipo da Sandbox, com o objetivo de viabilizar a visualização de uma topografia real em ambiente de bancada e em escala reduzida. A aplicação concentrou-se na análise do escoamento superficial e da dinâmica do fluxo hídrico na área correspondente ao município de Ferreira Gomes/AP (Figura 04).

A maquete física foi posicionada no interior da caixa e recoberta por uma camada de areia. A adoção desse procedimento justifica-se pela baixa granulometria do material, que proporciona melhor acomodação sobre a superfície modelada, contribuindo para maior fidelidade na representação do relevo e na simulação dos processos hidrológicos (Figura 05a, b).



Figura 04: Maquete de poliestireno (isopor) finalizada.
Fonte: Autores (2026)

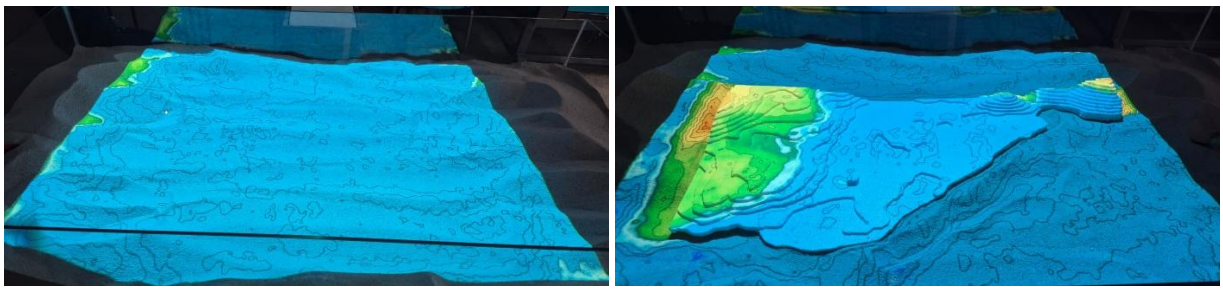


Figura 05: a) Preparação da areia para o recebimento da maquete; b) Maquete inserida na Sandbox.
Fonte: Autores (2026)

Resultados e Discussão

A partir da implementação do protótipo Sandbox no Laboratório de Engenharia Civil da UNIFAP, foi possível trabalhar com a representação e a análise de diferentes configurações de relevo, trechos de bacias hidrográficas e cenários associados à simulação do escoamento superficial da água. Ademais, a tecnologia mostrou-se uma ferramenta eficaz de apoio ao processo de ensino-aprendizagem relacionado à topografia e à representação coerente da dinâmica dos fluxos hídricos em meio natural. É relevante informar que a Sandbox implementada na UNIFAP configura-se como a primeira do Estado do Amapá e a terceira da região Norte do Brasil, conforme o *AR Sandbox World Map* (Figura 06), disponibilizado na página oficial dos desenvolvedores da tecnologia (última atualização em 2023) (KREYLOS, 2023).

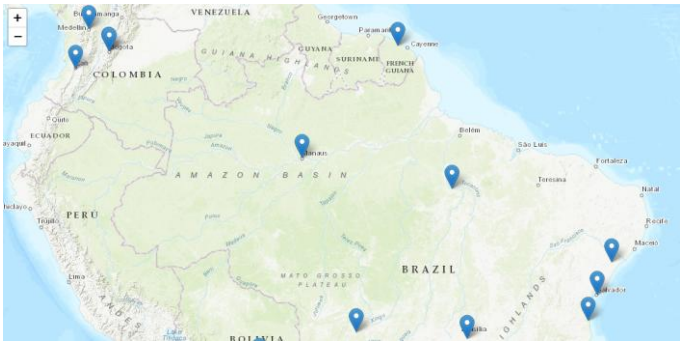


Figura 06: Mapa de localização de Sandbox.
Fonte: KREYLOS (2023). Disponível em:
https://web.cs.ucdavis.edu/~okreylos/ResDev/SARndbox/LinkWorldMap.html

Com a implementação e operação da Sandbox, após a confecção da maquete física topográfica de Ferreira Gomes/AP, foram realizados experimentos com o protótipo. O primeiro aspecto avaliado consistiu na inserção da maquete física no interior da caixa, recoberta por uma camada de areia, e na visualização das variações altimétricas projetadas sobre a superfície a partir do modelo da maquete física (poliestireno) da área de risco selecionada para o referido município (Figura 07a, b).

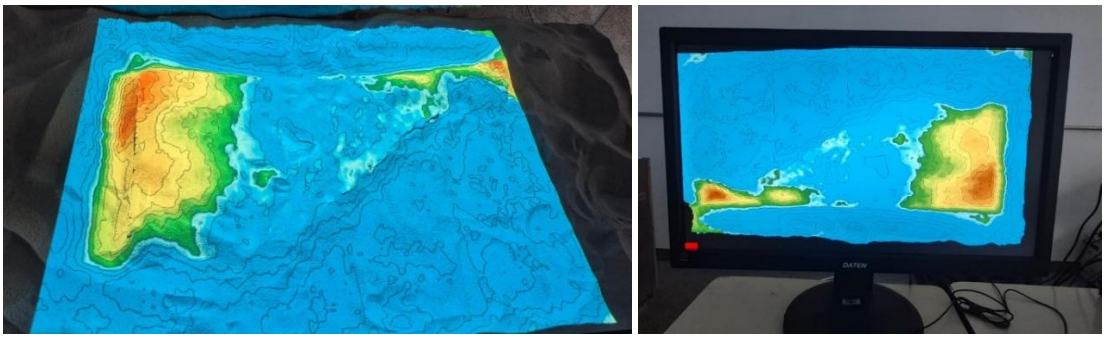


Figura 07: a) Vista frontal da maquete física de poliestireno sob a areia representando a área de risco às inundações de Ferreira Gomes; b) Vista da simulação no monitor.
Fonte: Autores (2026)

Observa-se na Figura 07a que a simulação apresenta distorções que se acentuam à medida que a visualização se afasta da região central e se aproxima das bordas da área de projeção das curvas de nível sobre a areia. Entretanto, tais distorções não comprometem a representação das curvas de nível correspondentes às elevações da maquete física, conforme verificado na imagem do monitor (Figura 07b). Ressalta-se que essa distorção também é observada na ausência da maquete física, indicando que a região central da Sandbox apresenta maior fidelidade de projeção, enquanto áreas periféricas estão mais suscetíveis às distorções geométricas em relação à superfície modelada e projetada pela maquete física na areia.

Na segunda etapa do experimento, foi realizada a simulação de precipitação sobre a área correspondente à maquete física (Figura 08a, b), com o objetivo de reproduzir um escoamento superficial e analisar a dinâmica deste fluxo hídrico no sistema de drenagem. Trata-se de uma área historicamente sujeita a eventos de inundações graduais e alagamentos urbanos recorrentes, apesar da haver três barragens de usinas hidrelétricas a montante. Portanto, o escoamento pode ser resultante da combinação entre os índices pluviométricos amazônicos, com vazões máximas recentes de $Q_{(27/04/2026)} = 3.500\ m^3/s$ de montante do rio Araguari (Figura 09a, b), influenciado pela operação das usinas hidrelétricas (CUNHA et al., 2014).

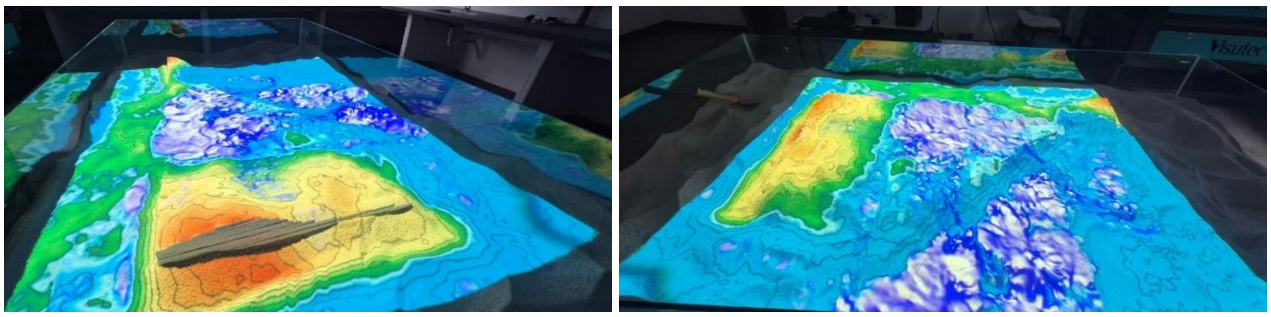


Figura 08: a) Vista lateral da simulação hídrica sobre a maquete física; b) Vista frontal da simulação hídrica.
(Vídeo complementar disponível em: https://youtube.com/shorts/smnzbVoTfpE?feature=shared)
Fonte: Autores (2026)



Figura 09: a) Registro de via inundada no bairro Centro em 2015; b) Registro de alagamento de casas no bairro Matadouro em 2021. Fonte: Agência de Notícias do Amapá (2015; 2021)

Além dos registros de inundações e alagamentos apresentados na Figura 09, observa-se um histórico recente de eventos hidrológicos adversos que evidenciam, entre outros aspectos, a vulnerabilidade da malha urbana frente a episódios de chuvas intensas (CUNHA et al., 2014). Tal condição é particularmente crítica atualmente nos bairros Matadouro e Centro, que constituem a área de estudo desta pesquisa e estão localizados nas porções mais baixas da cidade (CUNHA et al., 2026). Esta maior suscetibilidade está diretamente associada às cotas altimétricas predominantes, uma vez que valores entre 3,00 m e 5,00 m correspondem às zonas com maior recorrência de alagamentos, classificadas como de risco elevado. Por sua vez, cotas entre 5,00 m e 5,50 m estão relacionadas a cenários de inundações sazonais, caracterizando áreas de risco intermediário (CUNHA et al., 2026).

Nesse sentido, a partir da simulação do escoamento superficial sobre a superfície modelada na areia, foi possível identificar a área potencialmente alagada bem como o sentido e a dinâmica do fluxo hídrico representada pela maquete física. Observou-se o sentido coerente do escoamento em direção às áreas de cotas mais baixas e correspondente às margens do rio Araguari. Além disso, observou-se o acúmulo de água em porções centrais do modelo, associadas a áreas deprimidas do relevo adjacente.

Considerações Finais

As análises realizadas demonstraram que a tecnologia Sandbox-RA apresenta desempenho satisfatório na representação de superfícies topográficas e na simulação de processos hidrológicos, evidenciando sua capacidade de reproduzir o escoamento superficial e identificar padrões de fluxo em tempo real em áreas de acúmulo de água na maquete física do município de Ferreira Gomes/AP. Estes resultados reforçam o potencial uso da ferramenta como suporte à análise de eventos extremos de inundação e à compreensão da dinâmica hidrológica em áreas urbanas vulneráveis e suscetíveis a alagamentos, enchentes e inundações.

Entretanto, observou-se ainda, durante os experimentos, a presença de distorções na projeção das curvas de nível, especialmente nas regiões periféricas da caixa de areia. Nesse sentido, a pesquisa ainda apresenta limitações, necessitando de ajustes metodológicos, com o objetivo de calibrar o modelo e minimizar o problema, buscando maior aderência entre a superfície modelada e a projeção gerada pelo sistema.

Adicionalmente, verificou-se que, na atual fase de implementação do protótipo, a utilização de maquetes físicas em menores dimensões pode representar uma alternativa mais adequada, uma vez que concentra a área de análise na região central da Sandbox, onde as distorções são reduzidas ou inexistentes. Essa adequação tende a proporcionar maior correspondência com o mapa de elevações, embora demande, por sua vez, a ampliação da escala do modelo computacional (*software*) para manter o nível de detalhamento da representação.

Apesar dessas limitações, a Sandbox evidenciou resultados promissores e consistentes, especialmente no que se refere à simulação do escoamento hídrico da RA e à análise qualitativa de cenários hidrológicos, destacando-se como uma ferramenta tecnológica de elevado potencial de aplicação, abrangendo não apenas estudos em drenagem urbana, mas também diversas áreas das Geociências e Planejamento em Saneamento, com ampla possibilidade em pesquisa e análise de fenômenos naturais.

No âmbito educacional, a Sandbox apresenta-se como um recurso didático também promissor para o ensino e aprendizagem de conteúdos relacionados à topografia, relevo, fluxos hídricos e dinâmica do terreno natural, podendo ser aplicada desde o ensino fundamental e médio até a formação em nível superior. Sua abordagem interativa e visual contribui significativamente para a compreensão de conceitos complexos e abstratos, tornando o processo de ensino mais dinâmico e acessível.

Por fim, considerando sua integração ao contexto do projeto Tedplan, destaca-se o potencial de incorporação da Sandbox como ferramenta de apoio à elaboração de produtos dos Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB) no que se refere a popularização da ciência e ao controle social, especialmente quanto aos debates sobre os eixos de drenagem urbana, esgotamento sanitário e abastecimento de água. Tais evidências permitem a inserção da inovação tecnológica no campo prático do saneamento básico, ampliando as possibilidades de planejamento, análise e tomada de decisão frente aos eventos hidrológicos extremos.

Agradecimentos

Os Autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq PQ # 308302/2025-7), à Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), ao Núcleo de Inovação e Transferência de Tecnologia (NITT), ao Laboratório de Engenharia Civil da UNIFAP e ao Projeto TedPlan (016/2018) – FUNASA pelo apoio institucional e suporte financeiro recebido.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, R. F. AR Sandbox: Aplicação da Realidade Aumentada para a conscientização sobre os riscos de áreas alagadas na proliferação do vetor Aedes aegypti da Dengue. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2023. Disponível em: https://monografias.ufop.br/handle/35400000/5893 . Acesso em: 14 mar. 2025.

BRAZ, G. A. G.; MEZZOMO, M. D. M.; KAWAMOTO, A. L. S. SARndbox UTFPR – Caixa de areia interativa de realidade aumentada. In: SEI – Seminário de Extensão e Inovação da UTFPR, 2019, Campo Mourão. Anais […]. Campo Mourão: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

CARVALHO, T. P. de; MALCHER, J. A. S.; BRITO, D. M. C. A percepção socioeconômica dos atingidos pelas usinas hidrelétricas do rio Araguari/AP, Amazônia Oriental. Ambiente & Sociedade, São Paulo, v. 26, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210216r2vu2023L1AO.

CAUDELL, T.P., AND MIZELL, D.W. 1992. Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In Proceedings of 1992 IEEE Hawaii International Conference on Systems Sciences, p. 659–669.

CUNHA, A. C. et al. Evento extremo de chuva vazão na bacia hidrográfica do rio Araguari, Amapá, Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 29 (Edição Especial), 2014. p. 95–110.

CUNHA, A. C.; OLIVEIRA, A. C. Plano de Trabalho de Iniciação Tecnológica (PIBITI/CNPq- DPq/PROPESPG/UNIFAP). 8 p. Macapá: Universidade Federal do Amapá – UNIFAP, Departamento de Engenharia Civil, 2024.

CUNHA, A. C. et al. Produto C: Diagnóstico Técnico-Participativo do município de Ferreira Gomes/AP (versão preliminar). Macapá: Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) / Projeto TedPlan, 2026. Disponível em: https://saneamento.unifap.br/wp-content/uploads/2026/04/PRODUTO-C-FG-Versao-Preliminar-VP-06.04.2026.pdf.

CUNHA, C.; RODRIGUES, H.; LEMES, M.; ROSAS, R.; TEIXEIRA JÚNIOR, J. C. SandBox: caixa de areia de realidade aumentada aplicada ao ensino de geomorfologia. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA (SINAGEO), 12., 2018, Crato, CE. Anais [...]. Crato: UGB, 2018. Disponível em: https://www.sinageo.org.br/2018/trabalhos/4/4-410-1305.html. Acesso em: 20 mar. 2026.

KAWAMOTO, A. L. S. et al. Manual de instalação, configuração e uso da Caixa de Areia de Realidade Aumentada (SARndbox). 2016. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/5908. Acesso em: 08 jan. 2021.

KREYLOS, Oliver. Augmented Reality Sandbox. 2023. Disponível em: https://web.cs.ucdavis.edu/~okreylos/ResDev/SARndbox/.

MIGUEZ, M.G, DI GREGÓRIO, L.T. e VERÓL, A.P. Gestão de riscos e desastres hidrológicos. 1ª. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. 340 pg.

MILANTONI, Luanna de Oliveira; COSTA, Vinicius Moura; MOLIN, Paulo Guilherme. Caixa de areia de realidade aumentada: guia de confecção e aplicações de ensino. Buri: UFSCar/CPOI, 2021. 36 p. ISBN 978-65-86558-42-5.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). 2006. Learning to think spatially: GIS as a support system in the K–12 curriculum. Washington, DC: National Academies Press.

PACHECO, C.E.S.; SOUSA, T. S.; ARAUJO, E. P.; CUNHA, A. C. Dimensioning Urban Drainage Systems in Housing Subdivisions in the Amazon Using Different Hydrological Models. JOURNAL OF GEOSCIENCE AND ENVIRONMENT PROTECTION, v. 11, p. 151-170, 2023.

SOUSA, R. R. Oficina de maquete de relevo: um recurso didático. Barra do Garças: Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), 2014.

SOUSA, T.S.; VIEGAS, C.J.T.; CUNHA, H.F.A.; CUNHA, A.C. Drainage and preliminary risk of flooding in an urban zone of Eastern Amazon. JOURNAL OF GEOSCIENCE AND ENVIRONMENT PROTECTION, v. 11, p. 1-16, 2023.

SOUZA, B.L.R.A.; ARAUJO, E.P.; ABREU, C.H.M.; SALIM NETO, J.; CUNHA, H.F.A.; CUNHA, A. C. Pre-dimensioning and Technical, Economic and Environmental Feasibility Analysis of Sub-river outfalls in Macapá and Santana cities, Amapá State, Brazil. JOURNAL OF COASTAL CONSERVATION, v. 28, p. 1-16, 2024.

ANÁLISE DA SEVERIDADE DOS EXTREMOS CLIMÁTICOS E DOS DESASTRES ASSOCIADOS ÀS VARIABILIDADES CLIMÁTICAS NA BACIA DO RIO IPOJUCA EM PERNAMBUCO

1 Amanda Vitória de Moreira Bezerra, 2 Frederico Abraão Costa Lins, 3 Werônica Meira de Souza
1 UFAPE (Universidade Federal do Agreste de Pernambuco), e-mail: amanda.moreira@ufape.edu.br 2 UFAPE, e-mail: fredericolins-pnpd@ufape.edu.br; 3 UFAPE, e-mail: weronica.meira@ufape.edu.br

Palavras-chave: Extremos climáticos; Bacia do Rio Ipojuca; Índice de Anomalia de Chuva.

Resumo

Este estudo avaliou a severidade dos extremos climáticos na Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca (PE), entre 1960 e 2025, e sua relação com desastres associados a excesso ou escassez de chuvas. Utilizaram-se dados pluviométricos da APAC, tratados pelo método de Thiessen, e o Índice de Anomalia de Chuva (IAC). Os resultados mostraram forte variabilidade interanual, com anos extremamente secos (1993, 1998, 2012) e muito úmidos (2000, 2011, 2022). A análise espacial revelou que municípios litorâneos apresentaram as maiores amplitudes de IAC (até -17,0 em Ipojuca em 1998 e +8,3 em Escada em 2000). Os registros de desastres (S2ID) confirmaram estiagens nos períodos de IAC negativo e enxurradas/inundações nos anos de IAC positivo. Conclui-se que o IAC é ferramenta útil para o planejamento e gestão de recursos hídricos na bacia, auxiliando na redução da vulnerabilidade socioambiental.

Introdução

Eventos climáticos extremos têm se tornado mais frequentes e intensos nas últimas décadas, constituindo ameaça significativa aos ecossistemas, à sociedade e à economia. Esses eventos, caracterizados por secas prolongadas, inundações, ondas de calor ou de frio, respondem a alterações no ciclo hidrológico regulado por variáveis climáticas que controlam a distribuição e a intensidade das precipitações (Tejadas *et al*., 2016; Tonkin, 2022). O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) alerta para o aumento na frequência, intensidade e duração de diversos eventos extremos, sobretudo ondas de calor, cuja ocorrência se intensificou desde a década de 1950 (IPCC, 2021). O aquecimento global, com aumento de aproximadamente 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais já registrado em 2024, contribui para a intensificação do ciclo hidrológico, modificando padrões de precipitação e ampliando extremos climáticos em diversas regiões (Copernicus, 2026).

No Brasil, a intensificação dos eventos extremos manifesta-se de forma heterogênea. Episódios de precipitação intensa, como as chuvas que atingiram Santa Catarina em 2008 e o Rio de Janeiro em 2012, provocaram inundações, deslizamentos e perdas humanas expressivas (Ribeiro *et al.*, 2014; Freitas *et al*., 2005). Paralelamente, secas severas foram registradas na Amazônia em 2005, 2010 e 2015/2016, além da estiagem que afetou grande parte do território brasileiro entre 2014 e 2015 (Marengo, 2009; Marengo *et al.*, 2011; Coelho *et al*., 2015). No Nordeste brasileiro, a irregularidade das chuvas constitui uma das principais características climáticas da região. A distribuição espacial e temporal da precipitação ocorre de forma heterogênea, resultando em anos com volumes acima da média e outros marcados por estiagens prolongadas. Múltiplos episódios de seca vêm sendo documentados desde o século XVI, evidenciando a forte irregularidade do regime pluviométrico (Marengo *et al.*, 2017; Marengo *et al.,* 2018). A seca plurianual que atingiu o Nordeste entre 2012 e 2017 é considerada uma das mais severas das últimas décadas, provocando prejuízos à agricultura, pecuária, indústria e escassez de água potável (Barbosa *et al*., 2019; Gutiérrez *et al*., 2014).

No estado de Pernambuco, aproximadamente 64% dos municípios encontram-se inseridos no semiárido (IBGE, 2010; Silva *et al.*, 2017). Nesse contexto, a Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca (BHRI) reflete, em escala regional, a dualidade climática observada globalmente. A bacia possui grande importância ambiental e socioeconômica, abrangendo 25 municípios e influenciando o abastecimento hídrico, a agricultura e o desenvolvimento regional. Monitoramentos recentes indicam intensificação das anomalias pluviométricas, com episódios alternados de déficit hídrico e precipitações intensas (TCE-PE, 2024). Diante disso, compreender a variabilidade das precipitações na BHRI torna-se essencial para a prevenção de desastres e a gestão dos recursos hídricos. Entre os métodos utilizados para avaliar essa variabilidade, destaca-se o Índice de Anomalia de Chuva (IAC), que permite identificar períodos com precipitações acima ou abaixo da média, classificando anos secos, normais ou chuvosos (Rooy, 1965; Freitas, 2005).

O presente estudo tem como objetivo analisar a variabilidade pluviométrica, os extremos climáticos e a tendência de precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca por meio da aplicação do IAC, relacionando-os com a ocorrência de desastres naturais associados ao regime de chuvas e a análise de tendência pelo teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall.

Material e Métodos

A Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca (BHRI) localiza-se integralmente em Pernambuco, entre as latitudes 8°09'-8°40' S e longitudes 34°57'-37°02' O. Seus limites são: ao norte, a bacia do rio Capibaribe e a Paraíba; ao sul, as bacias dos rios Una e Sirinhaém; a leste, pequenas bacias litorâneas e o Oceano Atlântico; a oeste, as bacias dos rios Ipanema e Moxotó (APAC, 2024).

O rio Ipojuca possui 320 km, orientação oeste-leste, regime intermitente (perene a partir do médio curso, próximo a Caruaru). A bacia ocupa 3.435,34 km² (3,49% do estado). Abrange 25 municípios: 14 com sede totalmente inseridas e 11 parcialmente inseridos. A Figura 1 apresenta o mapa de localização da BHRI, evidenciando sua orientação oeste-leste do Agreste ao litoral.

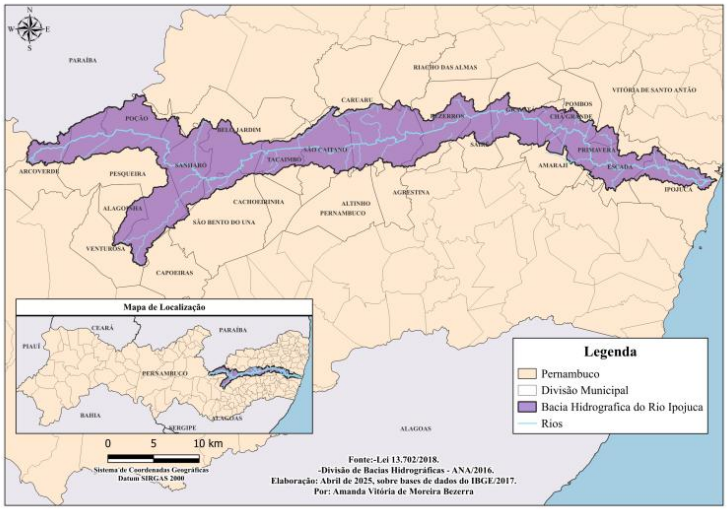


Figura 01: Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca.
Fonte: ANA (2016) e IBGE (2017).

Utilizaram-se séries históricas de precipitação mensal e anual (1960-2025) da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) para os 25 municípios da BHRI. As séries originais apresentavam lacunas, exigindo o seu preenchimento. Para preenchimento de falhas e espacialização da precipitação, aplicou-se o método dos Polígonos de Thiessen, conforme a equação abaixo, que delimita a área de influência de cada posto pluviométrico atribuindo maior peso às estações mais próximas. Esse procedimento garantiu séries contínuas e representativas para toda a bacia. Complementarmente, os registros de desastres naturais (estiagem, enxurradas, inundações e alagamentos) foram extraídos do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID) para o período de 2003 a 2016, correlacionando-os com as anomalias pluviométricas detectadas pelo Índice de Anomalia de Chuva (IAC).

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i \cdot A_i}{A_t}$$

Onde:
P_m = precipitação média espacial (mm);
P_i = precipitação medida no posto i (mm);
A_i = área do polígono correspondente ao posto i (km²);
A_t = área total da bacia ou município analisado (km²);
n = número de postos pluviometricos considerados.

A classificação da severidade dos anos secos e chuvosos foi efetuada mediante a aplicação do Índice de Anomalia de Chuva (IAC), desenvolvido por Rooy (1965) e adaptado por Freitas (2005). O cálculo do IAC baseia-se nas seguintes equações:

$$IAC = 3\left[\frac{(N - \underline{N})}{(\underline{M} - \underline{N})}\right], \text{ para anomalias positivas (1)}$$

$$IAC = -3\left[\frac{(N - \underline{N})}{(\underline{X} - \underline{N})}\right], \text{ para anomalias negativas (2)}$$

Onde:
N = precipitação anual (mm);
$\underline{N}$ = precipitação média anual da série histórica (mm);
$\underline{M}$ = média das 10 maiores precipitações anuais da série histórica (mm);
$\underline{X}$ = média das 10 menores precipitações anuais da série histórica (mm).

Anomalias positivas são valores acima da média histórica e anomalias negativas são valores abaixo da média histórica de precipitação. A partir da metodologia proposta por Freitas (2004 e 2005) e Araújo *et al*. (2007), foi utilizada a classificação de anos secos e úmidos como indicador climático para a intensidade destas anomalias, conforme mostra a Tabela 01.

	Faixa do IAC	Classe de Intensidade
Índice de Anomalia de Chuvas - IAC	Acima de 4	Extremamente úmido
	2 a 4	Muito úmido
	0 a 2	Úmido
	0 a -2	Seco
	-2 a -4	Muito seco
	Abaixo de -4	Extremamente seco

Tabela 01: Classes de Intensidade do Índice de Anomalia de Chuva.
Fonte: Araújo et al. (2007).

A espacialização do IAC e a confecção dos mapas da Bacia do Rio Ipojuca foram realizadas no QGIS 3.28, utilizando bases cartográficas do IBGE (2017) e da ANA (2016). Os dados pluviométricos interpolados por Thiessen foram importados por município, permitindo a classificação do IAC em seis categorias (de extremamente seco a extremamente úmido). A representação cartográfica adotou o sistema SIRGAS 2000, com escala gráfica e norte geográfico. Para os mapas dos anos selecionados (1985, 1993, 2012 e 2022), aplicou-se rampa de cores gradativa (vermelho para azul) para evidenciar a transição entre anomalias negativas e positivas. Os layouts foram exportados em 300 dpi para inserção no manuscrito.

A análise de tendência foi realizada para a média de precipitação anual da bacia do rio Ipojuca o pelo teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975). A estatística do teste (S) é descrita por:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} Sgn(x_j - x_i) \qquad (3)$$

em que, n é o número de pontos de dados, x_j e x_i referem-se a cada uma das medições em diferentes etapas de tempo i e j, com $i \neq j$; e Sgn $(x_j - x_i)$ é definido por:

$$Sgn = \begin{cases} 1, \text{ se } (x_j - x_i) > 0 \\ 0, \text{ se } (x_j - x_i) = 0 \\ -1, \text{ se } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \qquad (4)$$

Se o conjunto de dados for distribuído de forma idêntica e independente, então a média de S é zero e a variância de S é dada pela Equação 5:

$$Var(S) = \frac{\left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^{q} t(t-1)(2t+5)\right]}{18} \qquad (5)$$

em que: n - é o número do conjunto de dados; t - é o número de dados com valores repetidos em um determinado grupo; q - é o número de grupos contendo valores repetidos.

Durante uma longa série temporal, o valor estatístico S pode ser transformado em Zc, de acordo com as seguintes condições:

$$Z\left(\frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}, S>0;\ 0, S=0;\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}, S<0\right) \qquad (6)$$

Quando $-1,96 \leq Zc \leq 1,96$, aceita-se a hipótese nula (H0), o que indica que não existe uma tendência estatisticamente significativa na série temporal. A tendência é significativa no no nível de confiança de 95% se $|Z| > 1,96$ e no nível de confiança de 99% se $|Z| > 2,58$. Um valor de Zc positivo indica que a sequência tem uma tendência de aumento, enquanto um Zc negativo reflete uma tendência decrescente.

Após a identificação das tendências, realiza-se análise da magnitude da tendência por meio do teste da Curvatura de Sen (Sen, 1968), como de acordo com a Equação 7:

$$Q_i = \left(\frac{x_j - x_k}{j - k}\right), \text{ para } i = 1,2,3,\ldots N \qquad (7)$$

em que, x_j e x_k são os valores dados nos tempos j e k ($j > k$), respectivamente. A mediana desses valores de N de Qi é o estimador da declividade Sen. Quando os valores são positivos a tendência é positiva e quando os valores são negativos a tendência é negativa.

A análise de tendência de Mann-Kendall foi realizada com auxílio do pacote Kendall (McLeod, 2022) do software R (R Core Team, 2021) considerando um nível de significância de 5% de probabilidade.

Resultados e Discussões

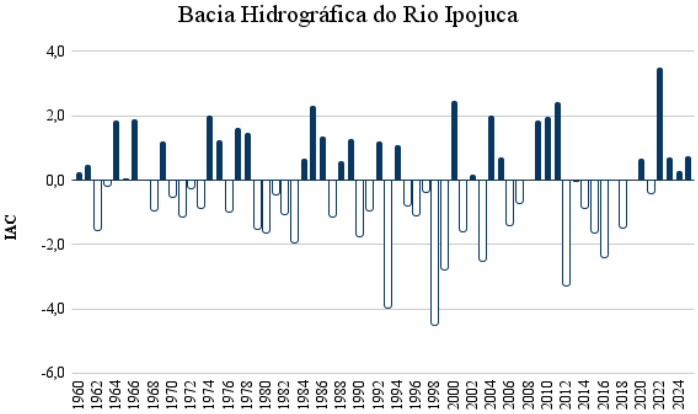
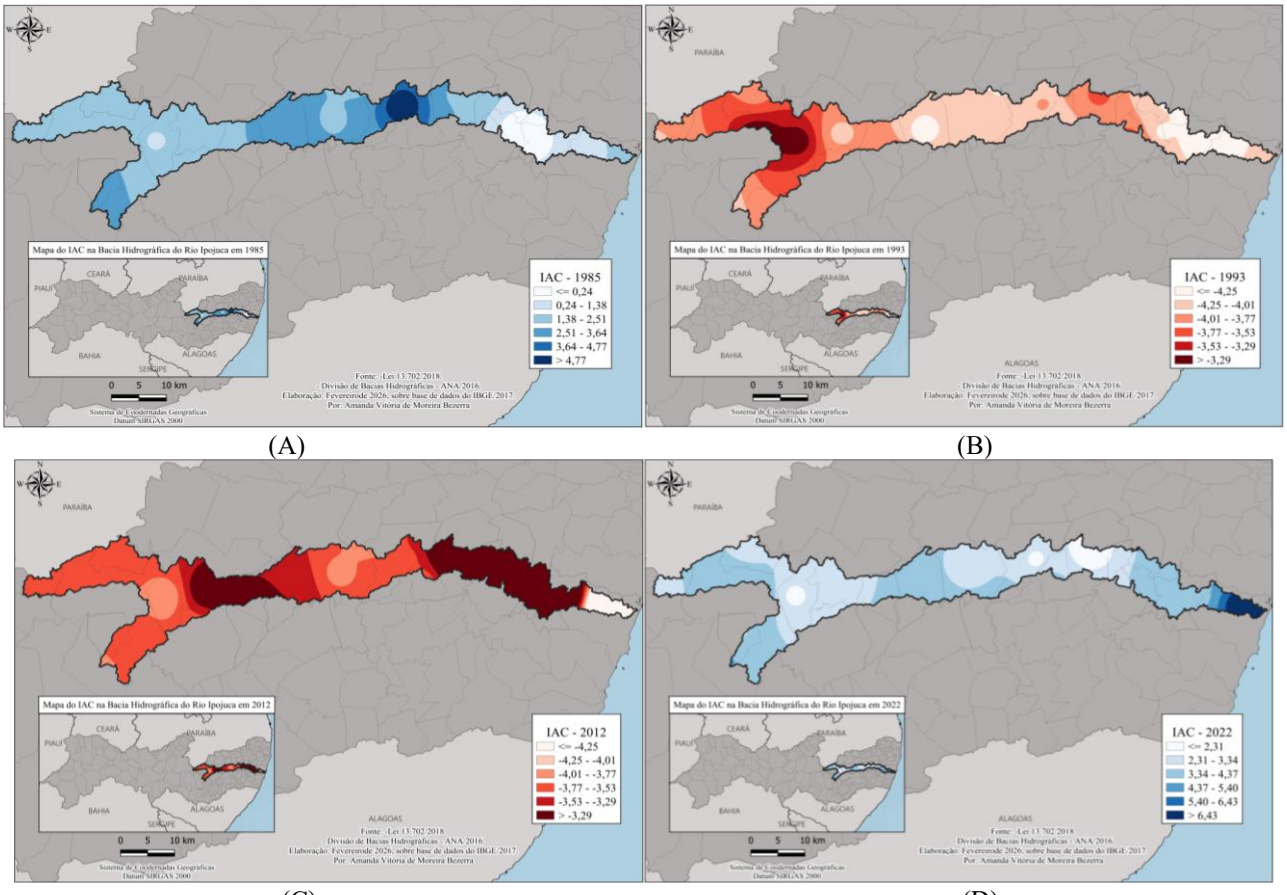


Gráfico 01: Índice de Anomalia de Chuva (IAC) para a Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca (1960–2025).
Fonte: Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2025), modificado pelos autores.

O Gráfico 1 revela elevada variabilidade interanual do Índice de Anomalia de Chuva (IAC) na Bacia do Rio Ipojuca entre 1960 e 2025, com alternância entre períodos secos e úmidos, padrão típico do Nordeste brasileiro. Entre 1960 e 1975, observou-se alternância equilibrada com anomalias de baixa intensidade. A partir da década de 1980, aumentou a amplitude das oscilações, indicando maior irregularidade. A década de 1990 destacou-se por secas severas, especialmente 1993, com IAC próximo a -4,0 (seca extrema), associada a episódios intensos de El Niño. No início dos anos 2000, houve recuperação das precipitações, com destaque para o ano 2000, que registrou um dos maiores IAC positivos da série, aumentando o risco de enchentes e inundações em áreas urbanizadas. Entre 2010 e 2020, novo período de extremos, com seca severa em 2012 (IAC inferior a -3,0). Nos anos recentes, observam-se anomalias positivas mais frequentes, com destaque para 2022 (precipitação muito acima da média). Conclui-se que a bacia permanece sujeita a regime climático altamente variável, alternando entre excesso e escassez de chuvas.



(A) (B)

(C) (D)

Figura 02: Distribuição espacial do Índice de Anomalia de Chuva (IAC) na Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca para os anos de 1985 (A), 1993 (B), 2012 (C) e 2022 (D).
Fonte: APAC (2025); ANA (2016); IBGE (2017). Elaborado pelos autores.

A distribuição espacial do Índice de Anomalia de Chuva (IAC) na Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca para os anos de 1985, 1993, 2012 e 2022 é apresentada na Figura 02, organizada nos painéis A, B, C e D, respectivamente. O painel A (1985) revela predominância de anomalias positivas em grande parte da bacia, com valores classificados como úmidos a muito úmidos, especialmente nos municípios da porção central e oriental (Caruaru, Gravatá, Vitória de Santo Antão), indicando um período de disponibilidade hídrica acima da média. O painel B (1993) mostra uma situação oposta, com predominância de anomalias negativas em praticamente toda a extensão da bacia, com valores classificados como muito secos a extremamente secos (IAC entre -2,0 e -4,0), especialmente nos municípios de São Bento do Una, Poção, Tacaimbó, Riacho das Almas e Altinho, associado à forte atuação do fenômeno El Niño. O painel C (2012) ilustra outro período de seca extrema, alinhado à seca plurianual de 2012-2017. Praticamente toda a bacia exibiu IAC negativo, variando entre -2,0 e -4,0, com os menores valores concentrados na porção central e oeste (Caruaru, Bezerros, Cachoeirinha, Sanharó), evidenciando déficit hídrico generalizado. Em contraste, o painel D (2022) mostra um cenário de anomalias predominantemente positivas em toda a bacia, com os maiores valores na porção leste (Ipojuca com IAC > 7,0; Escada com IAC > 8,0), enquanto municípios do Agreste apresentaram valores moderados (entre 2,0 e 4,0). Esse padrão indica recuperação pluviométrica significativa, mas também alerta para o risco de enchentes e inundações. Em síntese, a análise espacial evidencia forte heterogeneidade: áreas do Agreste são mais frequente e severamente afetadas por secas, enquanto a porção leste registra as maiores amplitudes positivas em anos chuvosos.

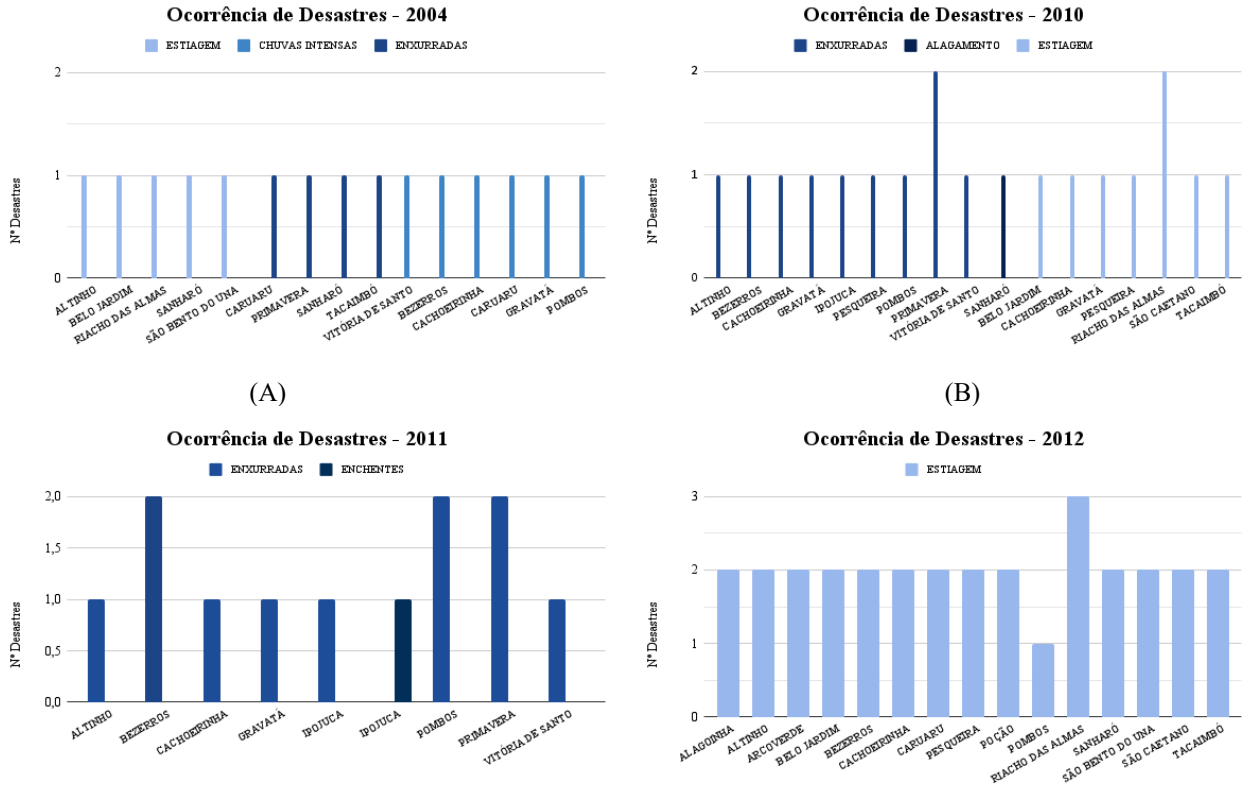


Gráfico 02: Ocorrência de Desastres na Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca em 2004 (A), 2010 (B), 2011 (C) e 2012 (D). Fonte: Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID, 2025), modificado pelos autores.

A correlação entre o Índice de Anomalia de Chuva (IAC) e os registros do S2ID evidenciou a influência da variabilidade pluviométrica na ocorrência de desastres na Bacia do Rio Ipojuca. Em 2004 (IAC levemente positivo), registraram-se estiagem (Altinho, Belo Jardim, Riacho das Almas, Sanharó, São Bento do Una), enxurradas (Caruaru, Primavera, Sanharó, Tacaimbó) e chuvas intensas (Vitória de Santo Antão, Bezerros, Cachoeirinha, Caruaru, Gravatá, Pombos), refletindo uma transição climática. Em 2010 (IAC positivo expressivo), ocorreram enxurradas em oito municípios (Altinho, Bezerros, Cachoeirinha, Gravatá, Ipojuca, Pesqueira, Pombos, Vitória de Santo Antão), duas em Primavera, e estiagem em seis municípios, demonstrando heterogeneidade espacial. Em 2011 (IAC muito elevado, >4,0), predominaram enxurradas (Altinho, Cachoeirinha, Gravatá, Ipojuca, Vitória de Santo Antão, e duas em Bezerros, Pombos, Primavera) e uma enchente em Ipojuca, associada ao transbordamento de rios. Em 2012 (IAC extremamente negativo, seca severa), todos os desastres foram do tipo estiagem, com destaque para Riacho das Almas (três ocorrências) e outros 14 municípios com uma ou duas ocorrências. Conclui-se que anos de IAC negativo correlacionam-se com estiagens, enquanto anos de IAC positivo elevado associam-se a enxurradas e enchentes.

Conforme apresentado no Gráfico 3, a série temporal de precipitação na bacia hidrográfica do rio Ipojuca evidencia uma tendência crescente ao longo do período analisado. Visualmente, observa-se elevada variabilidade interanual, com alternância entre anos mais secos e mais chuvosos; entretanto, destaca-se um incremento gradual dos totais pluviométricos,

especialmente nas últimas décadas. Essa tendência é corroborada pelo teste de Mann-Kendall ($z = 3{,}4643$; $p = 0{,}0005315$), que indica rejeição da hipótese nula de ausência de tendência, bem como pelos valores positivos da estatística S (627) e do coeficiente τ de Kendall (0,2923), sugerindo aumento consistente da variável ao longo do tempo. Adicionalmente, a estimativa da inclinação pelo método de Sen's slope foi de 4,53 mm·ano^{-1} (IC95%: 1,94–7,03), indicando aumento consistente da precipitação ao longo do tempo. Em conjunto, esses resultados evidenciam um sinal estatisticamente significativo de intensificação da precipitação na bacia do rio Ipojuca, apesar da forte variabilidade climática característica da região.

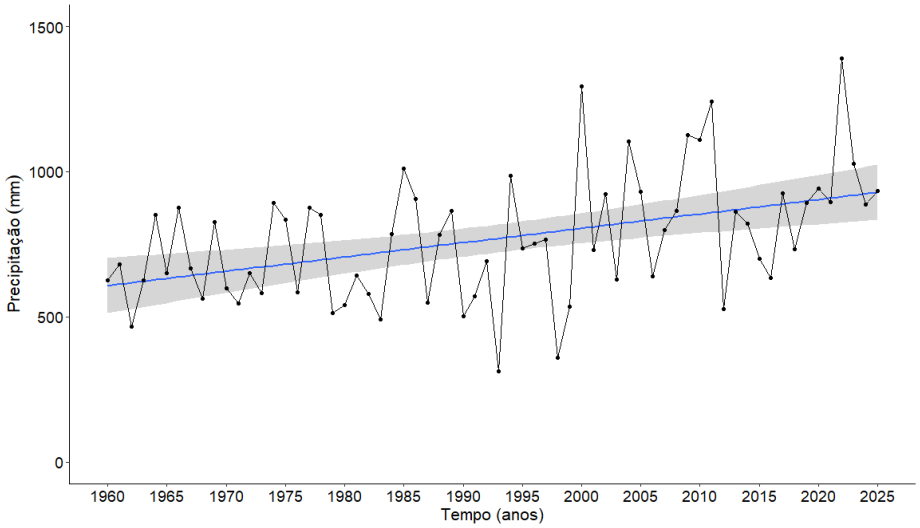


Gráfico 03: Tendência da precipitação para bacia do Rio Ipojuca a partir do teste de Mann-Kendall

Considerações Finais

A aplicação do Índice de Anomalia de Chuva (IAC) na Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca permitiu identificar uma elevada variabilidade climática interanual, com alternância entre anos extremamente secos (1993, 1998, 2012) e muito úmidos (2000, 2011, 2022). A análise espacial evidenciou que municípios da porção leste e central são mais suscetíveis a grandes amplitudes pluviométricas, enquanto os do Agreste apresentam maior frequência de anos secos. Os desastres registrados (estiagens, enxurradas, inundações) estão diretamente correlacionados aos períodos de anomalia negativa e positiva, respectivamente. O IAC mostrou-se uma ferramenta eficaz para o monitoramento e planejamento hídrico, podendo subsidiar ações de defesa civil e gestão de recursos hídricos na região. Os resultados indicam aumento significativo da precipitação na bacia do rio Ipojuca ao longo do período analisado, evidenciado pelo teste de Mann-Kendall ($p < 0{,}001$). A magnitude da tendência, estimada pelo Sen's slope, aponta incremento médio de 4,53 mm·ano^{-1}. Apesar da elevada variabilidade interanual, observa-se um sinal consistente de intensificação das chuvas na região. Recomenda-se que futuros estudos incorporem projeções climáticas e variáveis socioambientais para aprimorar a mitigação de riscos.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer à Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e ao Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID) pela disponibilização dos dados; à Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE) pelo apoio institucional; e ao Grupo de Pesquisa CLIMADEN pelo suporte científico.

Referências Bibliográficas

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Regiões hidrográficas brasileiras. Brasília: ANA, 2016.

APAC – AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. Dados pluviométricos do estado de Pernambuco. Recife: APAC, 2024.

APAC – AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. Dados pluviométricos do estado de Pernambuco. Recife: APAC, 2025.

ARAÚJO, L. E. de. Análise da variabilidade da precipitação pluvial no Nordeste do Brasil utilizando o Índice de Anomalia de Chuva (IAC). Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2007.

BARBOSA, H. A. et al. The 2012–2017 drought in the Brazilian Northeast: impacts and challenges for water resources management. Climate Research, v. 78, p. 73-88, 2019.

COELHO, C. A. S. et al. The 2014–2015 drought in Brazil and its impacts on water resources. Climate Dynamics, v. 45, p. 1-14, 2015.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE. Global Climate Highlights 2024–2025. Bonn: Copernicus, 2026.

FREITAS, M. A. S. de. Análise de eventos extremos de precipitação no Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 19, n. 2, p. 247-256, 2004.

FREITAS, M. A. S. de. Eventos hidrometeorológicos extremos e seus impactos no Brasil. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 3, p. 123-134, 2005.

FREITAS, M. A. S. de et al. (2014). Nota: esta referência foi citada no texto como "FREITAS et al., 2014", mas não consta na lista original do TCC. Caso não exista, substituir no texto por FREITAS, 2005.

GUTIÉRREZ, A. P. A. et al. Drought impacts and resilience strategies in semi-arid regions. Water Resources Management, v. 28, p. 233-248, 2014.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico 2010: resultados gerais da população. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Base cartográfica e informações territoriais do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

KENDALL, M. G. 1975. Rank Correlation Methods. London, Charles Griffin, 199 p.

MANN, H. B. Non-parametric test against trend. Econometrica, v.13, p.245-259, 1945.

MARENGO, J. A. Long-term trends and cycles in extreme rainfall and drought events in the Amazon basin. Climate Research, v. 37, p. 143-153, 2009.

MARENGO, J. A. et al. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. Geophysical Research Letters, v. 38, 2011.

MARENGO, J. A. et al. The drought of 2012–2015 in Northeast Brazil: impacts and perspectives. Climate Dynamics, v. 49, p. 1-12, 2017.

MARENGO, J. A. et al. Extreme drought in Northeast Brazil in 2012–2017. International Journal of Climatology, v. 38, p. 1-13, 2018.

MCLEOD, A. (2022). Kendall: Kendall Rank Correlation and Mann-Kendall Trend Test_. R package version 2.2.1, <https://CRAN.R-project.org/package=Kendall>.

R CORE TEAM (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

RIBEIRO, A. F. et al. Extreme rainfall events and landslides in Brazil. Natural Hazards, v. 72, p. 897-915, 2014.

ROOY, M. P. VAN. A rainfall anomaly index independent of time and space. Notos, Pretoria, v. 14, p. 43-48, 1965.

SILVA, R. M. et al. Variabilidade da precipitação e gestão de recursos hídricos no semiárido pernambucano. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 22, 2017.

S2ID – SISTEMA INTEGRADO DE INFORMAÇÕES SOBRE DESASTRES. Registros de desastres naturais. Brasília: MIDR, 2025. Disponível em: https://s2id.mi.gov.br. Acesso em: 01 dez. 2025.

TCE-PE – TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO DE PERNAMBUCO. Relatório de avaliação da gestão de riscos e desastres nos municípios pernambucanos. Recife: TCE-PE, 2024.

TEJADAS, A. et al. Extreme climate events and hydrological variability. Climate Dynamics, v. 47, p. 123-135, 2016.

TONKIN, L. Hydrological extremes and climate variability. London: Routledge, 2022.

GESTÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS EM MINAS DE CALCÁRIO NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA: VULNERABILIDADE, LACUNAS E DIRETRIZES OPERACIONAIS DE CURTO PRAZO

1 Nicolas dos Santos Rosa, 2 Lilian de Fatima Bencz

1 Universidade Federal de Viçosa, e-mail: nicolasdsrosa@gmail.com; 2 Universidade Federal do Paraná, e-mail: lilianbencz@ufpr.br;

Palavras-chave: mineração; mudanças climáticas; vulnerabilidade ambiental.

Resumo

A mineração de calcário a céu aberto na Região Metropolitana de Curitiba (RMC) responde por cerca de 50% da arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM) do Paraná, operando em rochas carbonáticas fraturadas e localmente cársticas. Esta revisão técnica estruturada (2019-2026) analisa projeções climáticas e evidências internacionais quantitativas e identifica a ausência de normas brasileiras que exijam a incorporação de cenários climáticos futuros no dimensionamento de drenagem de cavas. A literatura reporta, como ordens de grandeza, aumento potencial da vazão de pico de drenagem entre 8% e 49% até 2100 e redução do fator de segurança de taludes de 10-20% sob saturação rápida - valores transferidos por analogia climática e litológica, não como prognóstico local calibrado. Canais periféricos reduzem o influxo de água à cava em 30-70%; redundância automatizada de bombas diminui acidentes operacionais em até 80%. Diante da lacuna normativa, propõe-se, como roteiro preliminar, uma hierarquia de sete diretrizes priorizadas por custo e urgência para pequenas e médias mineradoras. O artigo reconhece como limitação central a ausência de modelagem local calibrada.

Introdução

A mineração de calcário na Região Metropolitana de Curitiba (RMC), especialmente nos municípios de Rio Branco do Sul, Campo Largo e Almirante Tamandaré, é atividade de relevância econômica para o Paraná. A Figura 1 localiza a RMC e a distribuição das principais áreas de ocorrência de rochas carbonáticas (Formação Capiru), onde se concentra a mineração de calcário. Ressalta-se, contudo, que a RMC não é homogênea em termos geológicos e operacionais; há variações entre municípios quanto ao grau de carstificação, à profundidade das cavas e aos sistemas de drenagem existentes, de modo que as generalizações aqui apresentadas devem ser tratadas com a prudência devida. Dados de 2022 indicam que a exploração de rochas carbonáticas já respondia pela maior arrecadação da CFEM no estado, concentrada em 15 municípios, especialmente nas formações Capiru, Votuverava e Itaiacoca (IAT, 2025). Os municípios da RMC abrangidos pelo Decreto do Aquífero Karst (Rio Branco do Sul, Itaperuçu, Almirante Tamandaré, Colombo, Campo Largo, Bocaiúva do Sul e Campo Magro) participaram, em 2022, com 43,3% do Valor Adicionado Fiscal (VAF) da Fabricação de Produtos de Minerais Não Metálicos do estado e com 36,1% do VAF da Extração de Minerais Não Metálicos, evidenciando a centralidade econômica da região (Informe Mineral 01/2025). Em 2024, o estado comercializou 73,46 milhões de toneladas de bens minerais, com o calcário respondendo por 30,4% do volume. A RMC concentrou 49,8% da arrecadação da CFEM em 2025, sendo Rio Branco do Sul o principal município arrecadador (R$ 9,09 milhões) (IAT, 2025; Governo do Paraná, 2025).

Embora dados recentes já evidenciem a liderança da RMC na arrecadação da CFEM, a importância histórica da região é consolidada na literatura: em 2004, a RMC foi responsável por 91% de todo o calcário produzido no Paraná (CPRM, 2017). Adicionalmente, a CPRM (2017) aponta que a região detém cerca de 85,5% das reservas paranaenses de rochas calcárias, com 5.200 Mt de calcário e 360 Mt de dolomito, reforçando sua condição de principal província calcária do estado.

As cavas estão inseridas em rochas carbonáticas das formações Capiru, Votuverava e Itaiacoca, caracterizadas por fraturamento natural e, localmente, carstificação (CPRM, 2017). Essa condição confere alta permeabilidade secundária, favorecendo a infiltração rápida e a conexão entre fluxos superficial e subterrâneo. Associada à topografia acidentada e à geometria rebaixada das cavas, a geologia carbonática amplifica a vulnerabilidade hidrológica das operações. Conforme descrito pela CPRM (2017), muitas pedreiras da RMC – especialmente as de brita – evoluem para lavras em cava abaixo da cota topográfica original, transformando-se em grandes reservatórios dependentes de bombeamento contínuo. Essa condição, observável também em minas de calcário, amplia a sensibilidade operacional frente a eventos extremos de precipitação.

O Paraná tem registrado aumento da variabilidade pluviométrica e da frequência de eventos extremos. Dados da Defesa Civil (1991-2023) apontam 1.763 desastres associados a precipitação, com enxurradas e chuvas intensas totalizando 51% das ocorrências. A RMC figura entre as áreas de maior concentração de alagamentos e inundações (Almeida & Carpenedo, 2024). Apesar desse cenário, o Brasil carece de norma específica da Agência Nacional de Mineração (ANM) que exija a consideração de mudanças climáticas no dimensionamento de sistemas de drenagem de cavas a céu aberto – diferentemente do que ocorre com barragens (Resolução ANM nº 95/2022). Este artigo, por meio de uma revisão técnica estruturada, analisa a vulnerabilidade hidrológica das minas de calcário da RMC, sistematiza evidências internacionais quantitativas e propõe, como roteiro preliminar, diretrizes operacionais hierarquizadas de curto prazo.

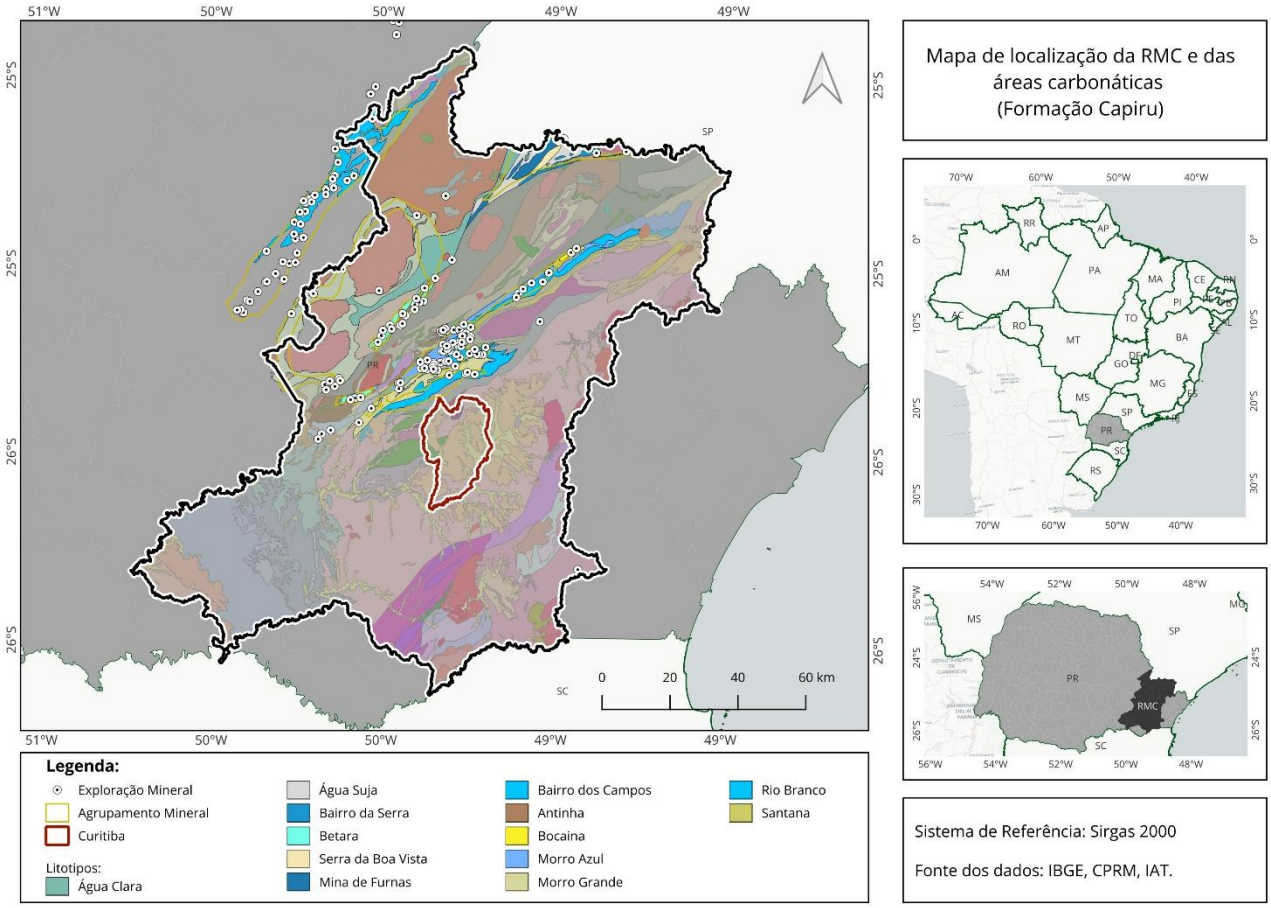


Figura 01: Localização da Região Metropolitana de Curitiba (RMC) e áreas de ocorrência de rochas carbonáticas da Formação Capiru, principal província de mineração de calcário do Paraná.
Fonte: Elaborado pelos autores com base em dados do IAT, CPRM e IBGE (2026)

Materiais e Métodos

Trata-se de uma revisão técnica estruturada de escopo, conduzida entre janeiro e abril de 2026, com o objetivo de identificar e sintetizar evidências quantitativas sobre impactos hidrológicos de chuvas extremas em minas a céu aberto, medidas de adaptação e exigências normativas, de modo a subsidiar uma análise de vulnerabilidade e a proposição de diretrizes para as minas de calcário da Região Metropolitana de Curitiba (RMC). As buscas foram realizadas nas bases Scopus e Web of Science, complementadas por pesquisas no Google Scholar para captura de literatura cinzenta (relatórios técnicos, teses, documentos de órgãos oficiais). Utilizaram-se combinações de descritores em português e inglês, incluindo "open-pit mining" AND "drainage" AND "extreme rainfall", "limestone mining" AND "climate change" AND "adaptation", "karst aquifer" AND "mine dewatering", "slope stability" AND "saturation" AND "mining", bem como "ANM" OR "normative" AND "mine drainage". Adicionalmente, foram consultados manualmente os sites institucionais da CPRM/Serviço Geológico do Brasil, do Instituto Água e Terra do Paraná (IAT), da Agência Nacional de Mineração (ANM), da International Mine Water Association (IMWA) e do Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD) para identificação de resoluções, informes técnicos e documentos de diretrizes.

Foram incluídos artigos originais e revisões publicados entre 2019 e 2026 que apresentassem dados quantitativos sobre aumento esperado de vazão de drenagem em cenários de mudanças climáticas, redução do fator de segurança de taludes devido à saturação rápida, ou efetividade de medidas de controle de águas pluviais – canais periféricos, redundância de bombas, monitoramento pluviométrico e reúso de água. Também foram incluídos relatórios técnicos oficiais brasileiros contendo dados primários de produção mineral, arrecadação da CFEM, localização de áreas de mineração e outorgas de captação de água no aquífero karst da RMC, bem como documentos normativos ou diretrizes que mencionassem explicitamente a exigência ou recomendação de incorporação de cenários climáticos futuros no dimensionamento de sistemas de drenagem de cavas a céu aberto. Foram excluídos estudos sem dados numéricos ou baseados apenas em modelagem conceitual não calibrada, trabalhos focados exclusivamente em mineração subterrânea e estudos realizados em clima árido ou semiárido sem correlação com o regime pluviométrico subtropical da RMC. Após a triagem por títulos e resumos, foram lidos na íntegra 42 artigos e documentos; destes, 22 forneceram dados quantitativos ou informações normativas efetivamente utilizáveis. Os valores percentuais extraídos – como aumento de vazão de drenagem (intervalos de 8% a 49% até 2100),

redução do fator de segurança de taludes sob saturação rápida (10% a 20%), redução do inflow proporcionada por canais periféricos (30% a 70%), redução de acidentes operacionais com redundância de bombas (até 80%), melhora do tempo-resposta com monitoramento pluviométrico e redução de custos anuais de bombeamento com otimização integrada (até 20%) – foram extraídos diretamente das publicações e são apresentados como intervalos representativos da literatura, não como resultado de meta-análise.

Para cada medida ou dado quantitativo, foi atribuída uma classificação de aplicabilidade à realidade da RMC (alta, média ou baixa) com base em julgamento técnico dos autores, considerando dois critérios explícitos: similaridade geológica (a área de estudo original envolve rochas carbonáticas fraturadas ou carstificadas, análogas às formações Capiru, Votuverava e Itaiacoca?) e similaridade climática (o clima da área original é subtropical ou temperado úmido, com eventos de chuva intensa comparáveis ao regime pluviométrico do Paraná, que apresenta médias anuais de 1.400-1.800 mm e ocorrência de chuvas convectivas de alta intensidade?). Essa classificação é qualitativa e subjetiva, não tendo sido validada por modelos hidrológicos ou geotécnicos específicos para a RMC.

Para a identificação da lacuna normativa, procedeu-se à leitura integral da Resolução ANM nº 95/2022 e de documentos de diretrizes internacionais disponíveis publicamente, buscando responder se a norma brasileira exige a consideração de cenários climáticos futuros no dimensionamento de drenagem de cavas a céu aberto e se há consenso internacional sobre essa obrigatoriedade. Com base na síntese das evidências e na análise normativa, foram formuladas sete diretrizes operacionais de curto prazo, direcionadas a pequenas e médias mineradoras da RMC (produção anual entre 0,5 e 5 milhões de toneladas; profundidade de cava até 150 m). A hierarquização das diretrizes (prioridades 1, 2 e 3) utilizou três critérios qualitativos definidos pelos autores: custo estimado (baixo, moderado, médio/alto), urgência (imediata, curto prazo, médio prazo) e impacto potencial na redução de riscos operacionais, sem análises quantitativas de custo-benefício. Este trabalho assume três limitações principais: ausência de modelagem local calibrada, transferindo percentuais da literatura internacional por analogia climática e litológica, sem constituir prognóstico específico para a RMC; subjetividade nas classificações de aplicabilidade e hierarquização, baseadas em julgamento técnico não validado; e escopo não exaustivo, pois a revisão não seguiu protocolos sistemáticos (como PRISMA) e pode ter omitido estudos relevantes não indexados nas bases consultadas. Dessa forma, o trabalho é exploratório e propositivo, oferecendo um ponto de partida para estudos futuros que incluam modelagem hidrológica local e análises de custo-benefício aprofundadas.

3. Resultados e Discussão

3.1. Vulnerabilidade hidrogeológica das minas de calcário da RMC

De acordo com a CPRM (2017), as rochas carbonáticas exploradas na RMC pertencem principalmente às formações Capiru, Votuverava e Itaiacoca. A Formação Capiru é caracterizada por metadolomitos com intercalações de filito e quartzito, originados em ambiente de baixo grau metamórfico (fácies xisto verde). O Grupo Votuverava, por sua vez, é formado predominantemente por mica xistos finos, com lentes de calcários e metabasitos, associados a depósitos turbidíticos de bacia oceânica profunda. Já o Grupo Itaiacoca é composto essencialmente por metacalcários dolomíticos com intercalações de metapelitos e metamargas (CPRM, 2017). Essa diversidade litológica, combinada com o fraturamento natural e a carstificação local, confere alta permeabilidade secundária às cavas, amplificando a vulnerabilidade hidrológica das operações.

A concentração da mineração de calcário em poucos municípios da RMC é evidenciada pelos dados históricos de produção. Segundo a CPRM (2017), a produção conjunta de calcário e dolomito em Rio Branco do Sul atingiu 39,4 milhões de toneladas, enquanto Almirante Tamandaré e Campo Largo registraram, respectivamente, 43,3 e 23,6 milhões de toneladas. Além disso, a participação relativa no valor de vendas de dolomito mostrou-se ainda mais desigual: Rio Branco do Sul foi responsável por 69% do valor comercializado, evidenciando o maior valor agregado do material extraído naquele município (CPRM, 2017).

Três fatores tornam as cavas de calcário da RMC potencialmente sensíveis a chuvas intensas: (i) geologia carbonática fraturada e localmente carstificada, que cria vias preferenciais de infiltração, com elevação rápida da pressão de poros e redução do fator de segurança de taludes; (ii) topografia acidentada, que favorece o escoamento superficial concentrado em direção às cotas mais baixas das cavas; (iii) proximidade do Aquífero Karst, estratégico para o abastecimento público, que impõe restrições adicionais ao rebaixamento e à qualidade da água bombeada (Informe Mineral 01/2025; Nascimento et al., 2024). A CPRM (2017) também destaca que diversas pedreiras da região encontram-se próximas ou abaixo do nível de base local, exigindo drenagem contínua tanto das águas pluviais quanto das águas de infiltração, o que aumenta a dependência operacional de sistemas de bombeamento.

A sobreposição entre mineração e captação de água subterrânea é crítica: dos sete municípios interceptados pelo decreto do Karst, quatro (Almirante Tamandaré, Colombo, Rio Branco do Sul e Itaperuçu) concentram 80,6% da exploração de água do aquífero, 94,2% da produção de rochas carbonáticas e 96,3% da CFEM arrecadada na região (Informe Mineral 01/2025). Esses números evidenciam o conflito de usos, amplificando a vulnerabilidade operacional das minas. Com base nesses fatores, levanta-se a hipótese técnica de que os sistemas de drenagem atuais possam estar subdimensionados para eventos extremos – inferência que, por não dispor de validação empírica local, deve ser tratada como hipótese. A Figura 2 sistematiza, de forma esquemática, a cadeia causal entre os fatores de vulnerabilidade e os principais grupos de riscos operacionais.

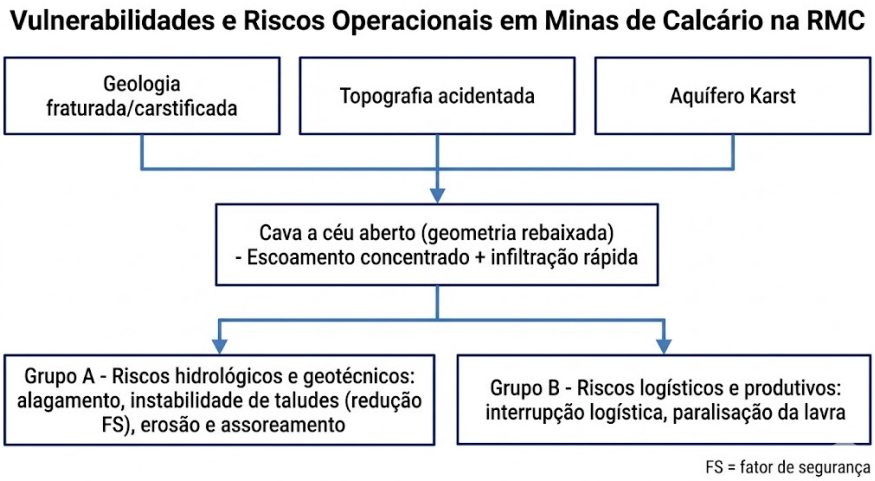


Figura 02: Fluxograma conceitual das vulnerabilidades e riscos operacionais em minas de calcário a céu aberto na RMC. FS = fator de segurança.
Fonte: Autores (2026).

3.2. Projeções climáticas e riscos operacionais - transferência por analogia

Diante dos fatores de vulnerabilidade identificados, analisam-se a seguir as projeções climáticas e os riscos operacionais reportados na literatura. Estudos em regiões de clima subtropical e temperado com litologia carbonática reportam que a vazão de pico de drenagem pode aumentar entre 8% e 49% até 2100 (Pontes et al., 2022; Costa et al., 2021) e que o fator de segurança de taludes pode reduzir de 10% a 20% sob saturação rápida (Irianto & Afasedanya, 2025; Theocharis et al., 2022). Embora esses estudos originais não tratem diretamente de minas de calcário em clima subtropical, a similaridade litológica e os mecanismos hidrológicos justificam sua aplicação como referência. Enfatiza-se que esses valores são ordens de grandeza provenientes da literatura internacional, não estimativas calibradas para a RMC. Sua transferência justifica-se pela similaridade climática (subtropical úmido) e litológica (rochas carbonáticas fraturadas), mas não substitui modelagem local. Os riscos operacionais diretos associados a esses cenários incluem: alagamento de cavas e sumps; instabilidade localizada de taludes e bermas; erosão acelerada e assoreamento de canais e bacias; interrupção logística por vias lamacentas.

3.3. Evidências internacionais quantitativas

A Tabela 1 sintetiza as principais medidas de adaptação, os efeitos reportados na literatura e a aplicabilidade estimada para a RMC, por julgamento técnico. Os percentuais são sínteses de estudos de caso (não meta-análise) e devem ser interpretados como ordens de grandeza; não se trata de comparação homogênea entre estudos, e os valores não devem ser lidos como precisos ou diretamente intercambiáveis. A classificação "média" para otimização integrada deve-se à dependência de viabilidade econômica do reúso, que varia conforme a operação.

Medida	Efeito reportado (literatura)	Aplicabilidade à RMC	Referências
Canais periféricos (segregação águas limpas)	Redução do inflow à cava: 30-70%	Alta – geologia e topografia favoráveis	Xiao et al., 2025; Pontes et al., 2022
Redundância de bombas (n+1 + gerador)	Redução de acidentes operacionais: até 80%	Alta – sistemas existentes podem ser adaptados	Gustafsson et al., 2021
Monitoramento pluviométrico com gatilhos	Melhora do tempo-resposta	Alta – baixo custo, fácil implementação	Ferreira et al., 2024
Otimização integrada (reúso, bombeamento)	Redução de custos anuais de bombeamento: até 20%	Média – depende da viabilidade de reúso	Wang et al., 2024

Tabela 01: Efetividade de medidas de adaptação (síntese da literatura) e aplicabilidade à RMC.
Fonte: Autores.

3.4. Lacuna normativa

A sobreposição entre mineração de calcário e captação de água subterrânea no Aquífero Karst é crítica: quatro municípios (Almirante Tamandaré, Colombo, Rio Branco do Sul e Itaperuçu) concentram 80,6% da exploração de água, 94,2% da produção de rochas carbonáticas e 96,3% da CFEM arrecadada na região (Informe Mineral 01/2025). Essa magnitude evidencia a necessidade de gerenciamento integrado entre mineração, abastecimento público e planejamento territorial – aspecto ainda não contemplado pelas normas vigentes. O levantamento da CPRM (2017) já apontava a intensidade da atividade extrativa: Rio Branco do Sul, por exemplo, concentrava 270 títulos minerários, sendo 202 para calcário, com 73 concessões de lavra.

Além da pressão sobre os recursos hídricos, as formações calcárias da RMC apresentam feições cársticas – dolinas e cavernas – que impõem restrições adicionais ao manejo das minas, por constituírem abrigos de espécies endêmicas e

reservatórios naturais de água (CPRM, 2017). Tais feições requerem cuidados específicos no dimensionamento dos sistemas de drenagem, uma vez que a desestabilização do carste pode afetar tanto a segurança da operação quanto a integridade do patrimônio espeleológico e hídrico regional.

No âmbito normativo, a Resolução ANM nº 95/2022 estabelece critérios de segurança apenas para barragens de mineração, não abordando sistemas de drenagem de cavas a céu aberto. Revisões internacionais (Bulovic et al., 2024; Schlef et al., 2022) indicam que, embora haja recomendação crescente para adoção de curvas IDF não estacionárias e fatores de segurança adicionais (20-50%), não há exigência consolidada em âmbito global de incorporação obrigatória de cenários climáticos futuros. A prática corrente ainda utiliza períodos de retorno de 2 a 8 anos, sem consideração explícita de mudanças climáticas (Cahyadi et al., 2021; Anatoly & Rofikoh, 2022). Essa lacuna normativa transfere a responsabilidade para as empresas, que podem adotar voluntariamente medidas preventivas.

3.5. Diretrizes operacionais de curto prazo - proposta como roteiro preliminar

As diretrizes a seguir constituem um roteiro preliminar para pequenas e médias mineradoras da RMC (definidas como aquelas com produção anual entre 0,5 e 5 milhões de toneladas e profundidade de cava até 150 m). Não substituem estudos executivos específicos nem validação em campo. A necessidade de diretrizes operacionais adaptadas às particularidades da RMC não é inédita. O próprio Serviço Geológico do Brasil, no projeto Materiais de Construção da Região Metropolitana de Curitiba, listou entre suas recomendações a proposição de um ordenamento territorial que permita a convivência harmônica entre mineração e expansão urbana, bem como a caracterização de cavas desativadas e a interação com grupos de pesquisa para ampliar as oportunidades de ação no setor mineral (CPRM, 2017). Essas recomendações corroboram a abordagem aqui adotada, que busca oferecer um roteiro preliminar e hierarquizado de medidas de curto prazo, reconhecendo a ausência de normativos específicos para a drenagem de cavas a céu aberto sob cenários de mudanças climáticas. A hierarquização (Tabela 2) é baseada em critérios técnicos dos autores: custo estimado, urgência e impacto potencial.

Prioridade	Diretriz	Ação concreta	Critério da prioridade
1 (imediata)	Monitoramento pluviométrico e gatilhos	Instalar pluviômetro automático; definir gatilhos (ex.: 30 mm/h → acionar bomba reserva)	Baixo custo, alto impacto potencial, implementação rápida
1 (imediata)	Capacitação e simulações	Treinamentos semestrais e simulações de emergência	Baixo custo, reduz improvisação
2 (curto prazo)	Revisão emergencial da drenagem	Inspecionar canais, sumps, bombas; simular vazões para TR 100 anos	Custo moderado, identifica gargalos
2 (curto prazo)	Segregação de águas limpas/sujas	Construir/recuperar canais periféricos (redução reportada: 30-70%)	Custo moderado, redução potencial do volume bombeado
2 (curto prazo)	Redundância em bombeamento e energia	Instalar bombas reserva (n+1) e gerador de emergência	Custo moderado, reduz acidentes (reportado: até 80%)
3 (médio prazo)	Armazenamento e reúso	Dimensionar bacias de sedimentação para reúso (supressão de poeira, irrigação)	Custo médio/alto, reduz custos de bombeamento (reportado: até 20%)
3 (médio prazo)	Incorporação de cenários climáticos	Atualizar projetos com fator de segurança 1,2-1,5 ou séries IDF não estacionárias	Dependente de projeto, ganho de robustez de longo prazo

Tabela 02: Proposta preliminar de diretrizes operacionais hierarquizadas.
Fonte: Autores.

Nota: Os percentuais de redução de inflow, acidentes e custos são extraídos da literatura internacional (Tabela 01) e não devem ser interpretados como garantia de desempenho nas condições específicas da RMC.

Considerações finais

As minas de calcário da RMC operam em contexto de potencial vulnerabilidade hidrogeológica (rochas carbonáticas fraturadas, topografia acidentada, interface com aquífero cárstico) e enfrentam cenário de aumento da frequência e intensidade de chuvas extremas. A literatura internacional reporta ordens de grandeza úteis como referência (aumento de vazão de 8-49%, redução do FS de 10-20%, efetividade de canais periféricos em 30-70%). Contudo, a principal limitação deste estudo é a ausência de modelagem específica para a RMC: os percentuais são transferidos por analogia climática e litológica, não constituem prognóstico local calibrado. A contribuição do artigo reside na sistematização dessas evidências em um roteiro preliminar de diretrizes, com explicitação constante das limitações. A lacuna normativa brasileira, pautada na ausência de exigência legal para incorporação de cenários climáticos no dimensionamento de drenagem de cavas, torna a adoção voluntária de medidas preventivas a alternativa disponível para reduzir riscos operacionais. As diretrizes hierarquizadas oferecem um roteiro prático: ações imediatas de baixo custo (monitoramento pluviométrico, capacitação), seguidas por investimentos moderados (canais periféricos, redundância de bombas) e adaptações estruturais de maior porte (reúso, revisão de projetos). Reitera-se que se trata de proposta não validada em campo, carecendo de calibração local.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Água e Terra (IAT), ao NUVEM/UFPR, ao IDR-Paraná, à Defesa Civil do Paraná e ao Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) pelos dados e relatórios disponibilizados via web.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, E. R. de; CARPENEDO, C. B. Análise da distribuição espacial e temporal de desastres ambientais no Paraná entre 1991 e 2023. IV Encontro Nacional de Desastres, 2024.

ANATOLY, N.; ROFIKOH, S. Dewatering requirements assessment for the Central Kalimantan NCP open pit gold mine. RISET Geologi dan Pertambangan, 2022.

BULOVIC, N.; McINTYRE, N.; TRANCOSO, R. Climate change risks to mine closure. Journal of Cleaner Production, v. 142697, 2024.

CAHYADI, T. A. et al. Study and design of mine drainage systems at open mine with extreme rainfall study case. AIP Conference Proceedings, 2021.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Projeto materiais de construção da Região Metropolitana de Curitiba, n. 21, 2017.

COSTA, C.; FERREIRA, D.; CARNEIRO, N. Climate extremes along the mining chain over the Eastern Amazon: projections to 2050. Applied Categorical Structures, v. 11, p. 125-147, 2021.

FERREIRA, D. et al. The role of meteorology in the mining chain in Northern Brazil. Advances in Image and Video Processing, v. 12, n. 3, 2024.

GOVERNO DO PARANÁ. Exploração de recursos minerais: CFEM 2025. Secretaria de Estado do Planejamento, 2025.

GUSTAFSSON, M.; RODRIGUEZ-MORALES, J.; DELLMUTH, L. Private adaptation to climate risks: evidence from the world's largest mining companies. Climate Risk Management, v. 100386, 2021.

INSTITUTO ÁGUA E TERRA (IAT). Informe Mineral 04/2025 – Base ANM/RAL. Curitiba, 2025.

AFASEDANYA, Mapuay Menasye Theo et al. STABILITY OF OPEN MINE SLOPE USING THE LIMIT EQUILIBRIUM METHOD AND RISK ANALYSIS TO SUPPORT MINING INFRASTRUCTURE PLANNING. INTAN Jurnal Penelitian Tambang, v. 8, n. 2, p. 35-41, 2025.

NASCIMENTO, E. R. et al. A mineração em rochas carbonáticas na Região Metropolitana de Curitiba – PR: desafios para a preservação do patrimônio cárstico e espeleológico. RAEGA, v. 59, 2024.

PONTES, P. et al. Effects of climate change on hydrology in the most relevant mining basin in the Eastern Legal Amazon. Water, v. 14, n. 9, 2022.

SCHLEF, K. et al. Incorporating non-stationarity from climate change into rainfall frequency and intensity-duration-frequency (IDF) curves. Journal of Hydrology, v. 128757, 2022.

THEOCHARIS, A. et al. From climate conditions to the numerical slope stability analysis of surface coal mines. Applied Sciences, v. 12, 1538, 2022.

WANG, S. et al. Optimization of waterproofing and drainage measures for open-pit mines based on seasonal rainfall time series prediction. Environmental Modelling & Software, v. 173, 105957, 2024.

XIAO, M. et al. Water hazard control and performance assessment in karst water-filled mines of Southern China. Water, v. 17, 3121, 2025.

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E PROJEÇÕES DE VAZÃO SOB CENÁRIOS CMIP6 NA BACIA DO RIO PATIVILCA (ANDES PERUANOS) UTILIZANDO SWAT E 14 MODELOS CLIMÁTICOS

1 Yenica Pachac-Huerta, 2 Waldo Lavado-Casimiro

1 Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz 02002, Perú, e-mail: ypachach@unasam.edu.pe; 2 Programa de Doctorado en Recursos Hídricos Escuela de Posgrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima 15024, Perú , e-mail: wlavado@senamhi.gob.pe

Palavras-chave: CMIP6; mudanças climáticas; projeções de vazão

Introdução

As mudanças climáticas representam um dos desafios mais significativos do século XXI, evidenciadas por alterações nos padrões de precipitação, aumento das temperaturas e maior frequência de eventos climáticos extremos, particularmente em regiões altoandinas como a bacia do rio Pativilca (Amat y León et al., 2008; Bello Chirinos et al., 2024; Proyecto Glaciares, 2019). Essas áreas apresentam elevada vulnerabilidade geomorfológica, ecológica e hídrica, afetando tanto os ecossistemas de montanha quanto os sistemas socioeconômicos que dependem dos recursos hídricos (Teklay et al., 2022).

O Peru abriga aproximadamente 71% dos glaciares tropicais da América do Sul, os quais alimentam rios estratégicos para o abastecimento hídrico e energético. No entanto, o seu acelerado retrocesso ameaça a sustentabilidade da oferta hídrica e a eficiência hidroenergética (Comisión Técnica Multisectorial, 2009; Villegas, 2025). Nesse contexto, os modelos de circulação geral da atmosfera (GCM), e em particular o projeto CMIP6, oferecem ferramentas robustas para projetar mudanças sob diferentes trajetórias socioeconômicas (SSP), possibilitando análises integradas do ciclo hidrológico futuro (Marras et al., 2021).

Esta pesquisa tem como objetivo analisar a variabilidade espaço-temporal das condições hidroclimáticas na bacia do rio Pativilca, utilizando o modelo SWAT calibrado com dados observados e forçado por quatorze modelos CMIP6, corrigidos por meio de mapeamento quantílico. São simuladas as vazões futuras sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, considerando dois períodos: 2030–2060 e 2070–2100. Essa avaliação permite identificar alterações na disponibilidade hídrica sazonal, fundamental para o planejamento energético e a adaptação climática em bacias andinas vulneráveis (Fernandez-Palomino et al., 2024; Ministerio del Ambiente, 2020).

Material e Métodos

A bacia do rio Pativilca localiza-se no nordeste do Peru, na América do Sul, envolvendo politicamente o território de cinco províncias distribuídas em dois departamentos (Lima e Áncash). A Autoridad Nacional del Agua (ANA) a classifica administrativamente dentro da Autoridad Local del Agua Barranca (ALA Barranca). Do ponto de vista geomorfológico, apresenta uma área de 4577 km², perímetro de 441,37 km e um rio principal com extensão de 178,44 km, com declividade média do canal principal de 2,74% e tempo de concentração de 861 minutos, estimado segundo a metodologia de Método de Kirpich (ANA, 2010). A altitude varia entre 25 e 6505 m s.n.m., sendo composta por diversas sub-bacias nas quais estão distribuídas estações meteorológicas e hidrométricas (Figura 1).

A bacia do Pativilca está localizada na região costeira do Peru e drena suas águas para o Oceano Pacífico (imagem à esquerda). Na Figura 1 apresenta-se o modelo digital de elevação (DEM), evidenciando a localização das estações hidrométricas (círculos verdes), destacando-se a estação Cahua situada na porção central do DEM; adicionalmente, são mostradas as estações meteorológicas (triângulos vermelhos na imagem à direita).

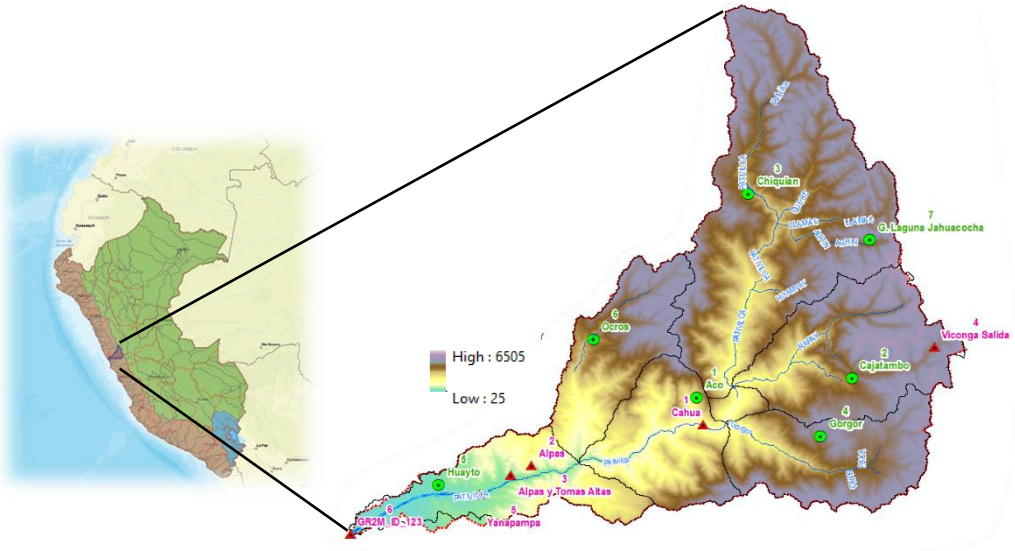


Figura 01: Mapa de localização da bacia do rio Pativilca. Fonte: Observatorio del Agua - ANA (2024)

Coleta de dados

Os dados utilizados na presente pesquisa incluem informações provenientes de sensoriamento remoto e dados de campo. Para a geração das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), foram empregados produtos de sensoriamento remoto, incluindo o Modelo Digital de Elevação (DEM), o tipo de solo e a cobertura do solo. O DEM da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com resolução espacial de 30 m e códigos S11W077 e S11W078, foi obtido por meio do Earth Explorer, gerenciado pelo United States Geological Survey, abrangendo uma faixa altitudinal de 0 a 6322 m s.n.m. A distribuição das declividades indica que 73,03% da área apresenta inclinações superiores a 30%, enquanto 12,43%, 9,13% e 5,41% da área correspondem aos intervalos de 20,0–30,0%, 10,0–20,0% e 0–10,0%, respectivamente (Figura 2a).

Os dados de cobertura do solo, também com resolução de 30 m, foram obtidos a partir do conjunto Global Land Cover, que disponibiliza dados de acesso livre e validados, incluindo onze classes distintas. As florestas mistas (FRST) predominam na paisagem, cobrindo 44% da área, seguidas por pastagens (PAST), com 30,32%. As áreas áridas (BARR) e florestas perenes (FRSE) representam 10,53% e 7,74%, respectivamente, enquanto as áreas agrícolas (AGRL) correspondem a 2,61%. Outros usos do solo, incluindo áreas urbanas (URML), pastagens naturais (RNGB) e corpos d'água (WATR), representam conjuntamente menos de 5% da área total (Figura 2b). O mapa de solos, na escala de 1:5.000.000, foi obtido a partir do banco de dados da Food and Agriculture Organization, disponível em seu catálogo de dados, incluindo seis tipos de solos. O tipo predominante corresponde aos litossolos com horizontes eólicos e coluviais (43,9%). Os litossolos com matéria orgânica, materiais coluviais e camadas cimentadas cobrem 18,07%, 17% e 15,59% da área, respectivamente. As áreas cobertas por glaciares e os fluvisolos eutróficos representam apenas 2,87% e 2,57%, respectivamente (Figura 2c).

Os dados históricos diários de precipitação e temperatura, referentes ao período de 1981 a 2015, incluindo informações de origem satelital, constituíram insumos fundamentais para o modelo SWAT. Os dados de precipitação em grade foram fornecidos pelo RAIN4PE, enquanto os dados de temperatura máxima e mínima foram obtidos do conjunto PISCO do Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Adicionalmente, foi desenvolvido um código em RStudio para a extração dos dados na área da bacia. Os dados hidrométricos diários da estação Cahua, localizada nas coordenadas -77,34 de longitude e -10,61 de latitude, abrangendo o período de 2000 a 2015, foram obtidos do Observatorio del Agua, parte do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, gerenciado pela Autoridade Nacional da Água do Peru. Essa estação, situada na porção média-baixa da bacia do Pativilca, é monitorada continuamente pela Statkraft Perú S.A. (Figura 2c).

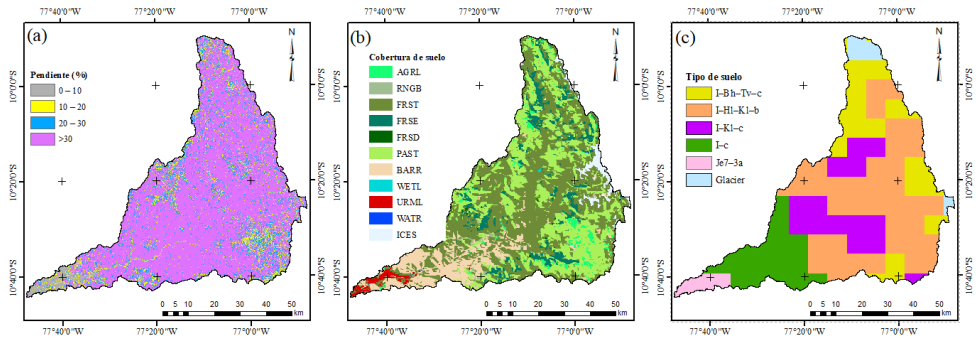


Figura 02: Distribuição espacial da declividade, cobertura do solo e tipos de solo da bacia do rio Pativilca. Fonte: elaboração própria com base nos dados processados (2026)

Os dados de PISCO e RAIN4PE foram utilizados como variáveis de entrada no modelo SWAT, enquanto os dados de vazão da estação Cahua foram empregados para a calibração e validação do modelo. Devido ao número limitado de estações meteorológicas com séries de longo prazo na área de estudo, os dados satelitais em grade foram essenciais para garantir a robustez do modelo. O período de 2000–2015 foi selecionado para os dados hidrométricos em função da disponibilidade de medições diárias confiáveis, fornecendo uma base sólida para a calibração e validação do modelo.

Dados dos Modelos de Circulação Global (GCM)

O conjunto de dados dos GCM foi obtido a partir do Copernicus Climate Change Service (https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset). Os modelos foram avaliados sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 do sexto relatório de avaliação do Intergovernmental Panel on Climate Change, considerando o período histórico (1981–2014), futuro próximo (2030–2060) e futuro distante (2070–2100). A pré-seleção dos modelos climáticos baseou-se em uma análise que considerou as melhores resoluções atmosféricas para a área de estudo, bem como a diversidade de dados provenientes de diferentes centros de modelagem, com horizonte de projeção até o ano de 2100.

Procedimento

O processo iniciou-se com a delimitação da bacia hidrográfica por meio de um Modelo Digital de Elevação (DEM) e da análise de declividade para definição de seus limites. Em seguida, foram geradas as Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), utilizando dados de DEM, cobertura do solo e tipos de solo, a fim de caracterizar regiões hidrológicas homogêneas. Posteriormente, foram incorporados insumos meteorológicos em grade, como RAIN4PE (precipitação) e PISCO (temperatura).

O processo prosseguiu com as etapas de calibração e validação, nas quais o modelo SWAT foi calibrado utilizando dados de vazão, com iterações de conjuntos de parâmetros no SWAT-CUP, incluindo análise de sensibilidade e avaliação de desempenho para otimização da simulação. Uma vez calibrado, o modelo foi validado com séries de vazão distintas do período de calibração, com o objetivo de avaliar sua acurácia.

Posteriormente, o modelo validado foi empregado para estimar os parâmetros hidrológicos das sub-bacias, os quais constituíram a base para a projeção de vazões futuras utilizando diferentes modelos climáticos (GCM) sob dois cenários climáticos.

Adicionalmente, ao longo do fluxograma metodológico, a regionalização e a análise de agrupamento por meio de dendrogramas garantiram uma seleção consistente de parâmetros e simulações em diferentes regiões, considerando variáveis como elevação, declividade, precipitação e temperaturas máximas e mínimas. Essa abordagem permitiu agrupar bacias com características similares, facilitando uma análise mais robusta e detalhada.

O modelo SWAT baseia-se na equação do balanço hídrico, apresentada na Equação (01).

$$\mathrm{SW}_t = \mathrm{SW}_o + \sum_{t=1}^{t} \left(R_d - Q_{sur} - W_{seep} - \mathrm{ET} - Q_{gw}\right) \qquad (01)$$

Onde: SW_té o armazenamento de água no solo no tempo t(mm), SW_0é o armazenamento de água no solo no início do período (mm), té o período de cálculo (dias), R_dé o volume de precipitação (mm), Q_{sur}é o escoamento superficial (mm), ETé a evapotranspiração (mm), W_{seep}é a água de infiltração para camadas mais profundas (mm) e Q_{gw}é o escoamento subterrâneo (mm) (Neitsch et al., 2011).

Configuração do Modelo SWAT

O modelo SWAT foi empregado para a modelagem hidrológica na bacia do rio Pativilca, fornecendo uma estrutura integrada para simular as complexas interações entre topografia, propriedades do solo, dados meteorológicos, vegetação e práticas de manejo do uso da terra. Os conjuntos de dados de entrada foram reprojetados para o sistema UTM zona 18S, a fim de garantir a consistência espacial em toda a área de estudo. A delimitação da bacia foi realizada com base em um Modelo Digital de Elevação (DEM), identificando-se o ponto de exutório como o canal principal de drenagem. A configuração do modelo foi conduzida utilizando a interface QSWAT para QGIS. A bacia foi subdividida em 77 sub-bacias com base no DEM, e as HRUs foram definidas por meio da sobreposição de dados de uso do solo, tipo de solo e declividade. A agregação dos resultados das sub-bacias foi realizada utilizando um método de média ponderada, incorporando parâmetros físicos relevantes, como elevação, área de drenagem e variáveis climáticas. Os produtos em grade provenientes de RAIN4PE e PISCO forneceram os dados meteorológicos, que foram posteriormente utilizados para estimar valores em cada sub-bacia com base em seus centroides.

Calibração do Modelo

A calibração e a análise de incerteza do modelo SWAT foram realizadas utilizando o SWAT-CUP, com o algoritmo Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2). O método SUFI-2 foi selecionado devido à sua comprovada capacidade de quantificar de forma eficiente tanto a incerteza dos parâmetros quanto a incerteza associada às saídas do modelo. Sete parâmetros-chave foram calibrados no modelo SWAT, o que demandou significativo esforço computacional e tempo de processamento. O modelo foi calibrado para o período de 2000 a 2011, considerando o primeiro ano (2000) como período de aquecimento (warm-up).

Validação do Modelo

Após a calibração, a validação do modelo foi conduzida por meio da comparação entre dados observados de campo (não utilizados na calibração) e as saídas simuladas pelo modelo, utilizando séries independentes do período de 2011 a 2015. Esta etapa foi fundamental para avaliar a capacidade preditiva do modelo sem a necessidade de ajustes adicionais nos parâmetros de entrada.

Avaliação do Desempenho do Modelo

O desempenho do modelo calibrado foi avaliado no SWAT-CUP utilizando os seguintes indicadores estatísticos: eficiência de Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de Kling-Gupta Efficiency (KGE), razão entre o erro quadrático médio e o desvio padrão dos dados observados (RSR) e viés percentual (PBIAS), considerando tanto os períodos de calibração quanto de validação.

Análise de Sensibilidade utilizando SWAT-CUP

A análise de sensibilidade foi realizada utilizando o SWAT-CUP, um programa de calibração e análise de incerteza desenvolvido para o modelo SWAT. Essa análise é fundamental para identificar os parâmetros mais influentes que afetam os resultados do modelo, orientando o processo de calibração e aprimorando o desempenho preditivo.

Foram empregadas duas métricas estatísticas para avaliar a sensibilidade: o t-Stat e o p-value. O t-Stat é uma medida que indica a sensibilidade de um parâmetro ao comparar seu coeficiente estimado com o erro padrão. Valores absolutos mais elevados de t-Stat sugerem que o parâmetro exerce influência significativa sobre os resultados do modelo. Essa métrica permite priorizar os parâmetros que requerem calibração mais precisa, devido ao seu maior impacto na simulação.

O p-value complementa o t-Stat, fornecendo uma medida da significância estatística de cada parâmetro. Um p-value baixo (tipicamente inferior a 0,05) indica que a influência do parâmetro nos resultados do modelo é estatisticamente significativa, ou seja, não atribuível ao acaso. Dessa forma, parâmetros com p-values reduzidos são considerados altamente sensíveis e essenciais para alcançar uma calibração robusta do modelo (Barresi Armoa et al., 2023; Li et al., 2024).

Resultados e Discussão

Variação sazonal das vazões médias projetadas pelos GCM sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 no período futuro

A variação sazonal das vazões médias projetadas pelos 14 modelos de circulação global (GCM) nos cenários SSP2-4.5 (Figura 3) e SSP5-8.5 (Figura 4) para o grupo A é apresentada para os períodos de futuro próximo (2030–2060) e futuro distante (2070–2100). Na primeira linha de cada figura, as vazões históricas (barras em azul claro) são comparadas com as vazões futuras (linhas tracejadas), evidenciando um aumento generalizado das vazões tanto no futuro próximo quanto no futuro distante, com maior variabilidade nas projeções de longo prazo. Esse comportamento é particularmente relevante para o planejamento de recursos hídricos, uma vez que os aumentos de vazão podem estar associados a mudanças nos padrões de precipitação e escoamento superficial.

Na segunda linha, observa-se a taxa de variação sazonal, na qual os resultados indicam que a maioria dos GCM projeta taxas positivas. Em particular, as projeções apontam aumentos de até 100% no futuro próximo e até 600% no futuro distante, sendo esses incrementos mais pronunciados nas bacias de menor altitude, que apresentam maior sensibilidade às mudanças climáticas. Esse aumento pode estar relacionado à intensificação de eventos hidrológicos extremos e ao maior aporte de escoamento nas regiões de jusante.

A análise por modelo individual (linha 3) revela que os GCM CNRM-CM6-1 e CNRM-ESM2-1 apresentam as maiores taxas de variação positivas, enquanto os modelos INM-CM4-8, INM-CM5-0, NES3 e NorESM2-MM indicam taxas negativas, sugerindo possíveis reduções nas vazões futuras.

Por fim, os correlogramas (linha 4) evidenciam alta correlação entre os resultados dos diferentes GCM em ambos os horizontes temporais e cenários, indicando consistência nas tendências projetadas pelos modelos. Ao comparar os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, observa-se que os incrementos nas vazões e nas taxas de variação são significativamente maiores no cenário SSP5-8.5, refletindo a elevada sensibilidade do sistema hidrológico a maiores níveis de emissões de gases de efeito estufa.

Essa análise também foi realizada para os grupos B a F; os resultados detalhados podem ser consultados em: https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/c8a30b34-fa67-4781-9e43-fda6d5be4b2d

A variação sazonal das vazões médias projetadas pelos 14 GCM sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 na bacia do rio Pativilca apresenta tendências consistentes com estudos recentes em bacias andinas e latino-americanas. Diversas pesquisas indicam que, sob cenários de altas emissões (SSP5-8.5), são projetados aumentos de temperatura entre 1°C e 4°C, bem como a intensificação de eventos extremos de precipitação, o que pode resultar em aumentos das vazões no futuro próximo (2041–2060) e em maior variabilidade até o final do século (2081–2100) (Bezerra de Melo et al., 2025; Lopera Muñoz, 2022). Por exemplo, na bacia Magdalena-Cauca, observou-se que as vazões tendem a aumentar em meados do século, enquanto no final do século XXI as projeções indicam tanto aumentos quanto reduções, dependendo do cenário e da sazonalidade, evidenciando a elevada sensibilidade dos sistemas hidrológicos às mudanças nos padrões de precipitação e temperatura (Lopera Muñoz, 2022).

De forma similar, estudos no Chile central baseados em modelos CMIP6 identificaram que a frequência e intensidade de eventos hidrológicos extremos, como cheias, tendem a aumentar sob cenários de altas emissões, o que pode explicar as taxas positivas de variação e os aumentos projetados de vazão, especialmente nas bacias de menor altitude (Pinto Garay, 2022). No entanto, a resposta das vazões não é homogênea entre modelos nem entre regiões, uma vez que alguns GCM projetam reduções nas vazões médias anuais, como reportado para determinadas bacias no norte do Peru e na Colômbia (Alberca et al., 2023; Fernández Cárdenas et al., 2025).

Essa divergência entre modelos e cenários ressalta a importância do uso de ensembles multimodelo e da consideração das incertezas inerentes às projeções hidrológicas para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos em contextos de mudanças climáticas (IPCC, 2021; Lopera Muñoz, 2022).

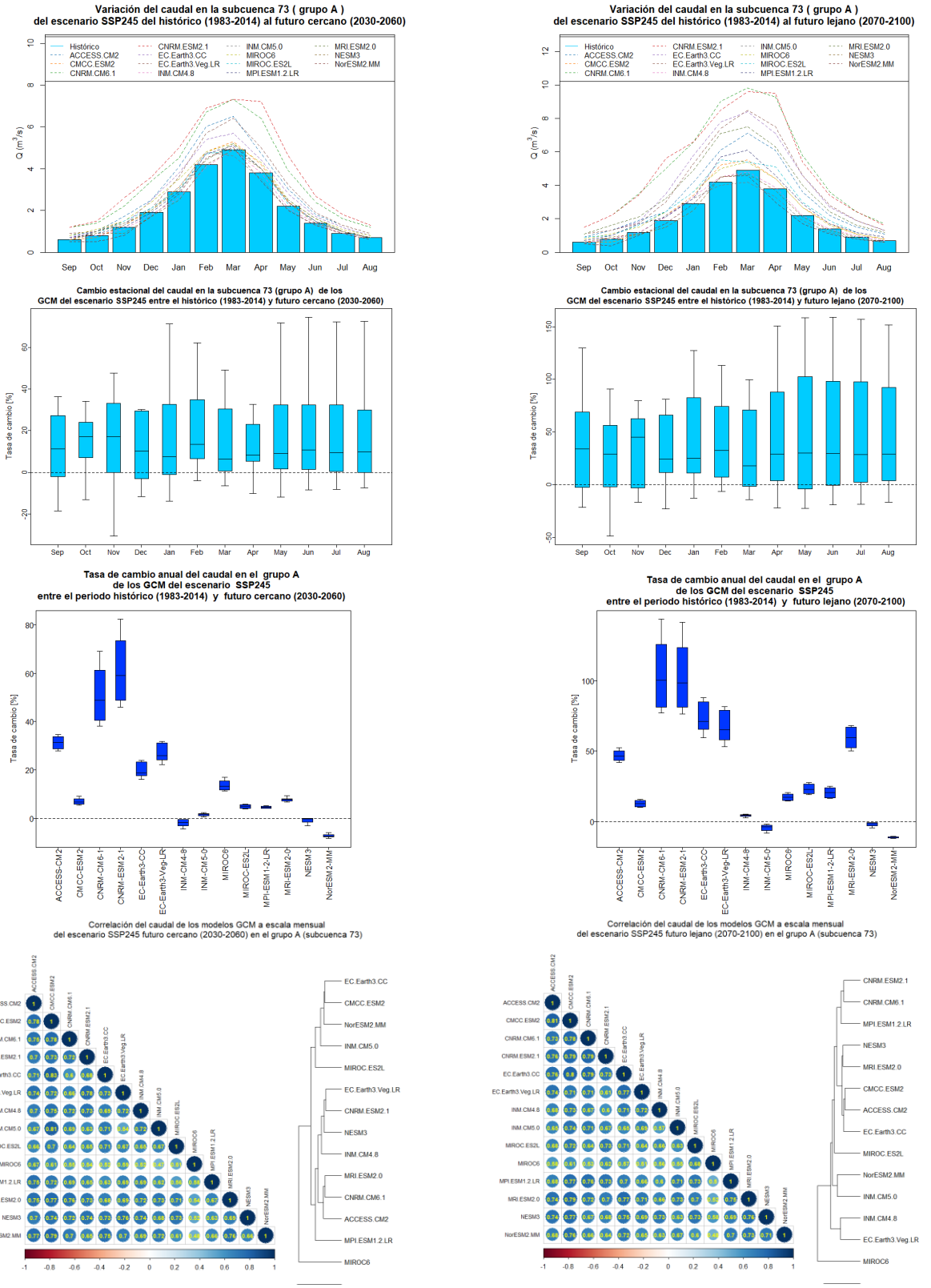


Figura 03: Variação da vazão média sazonal e correlograma dos GCM no cenário SSP2-4.5 nos períodos de futuro próximo e futuro distante para o grupo A.
Fonte: elaboração própria com base nos dados processados (2026)

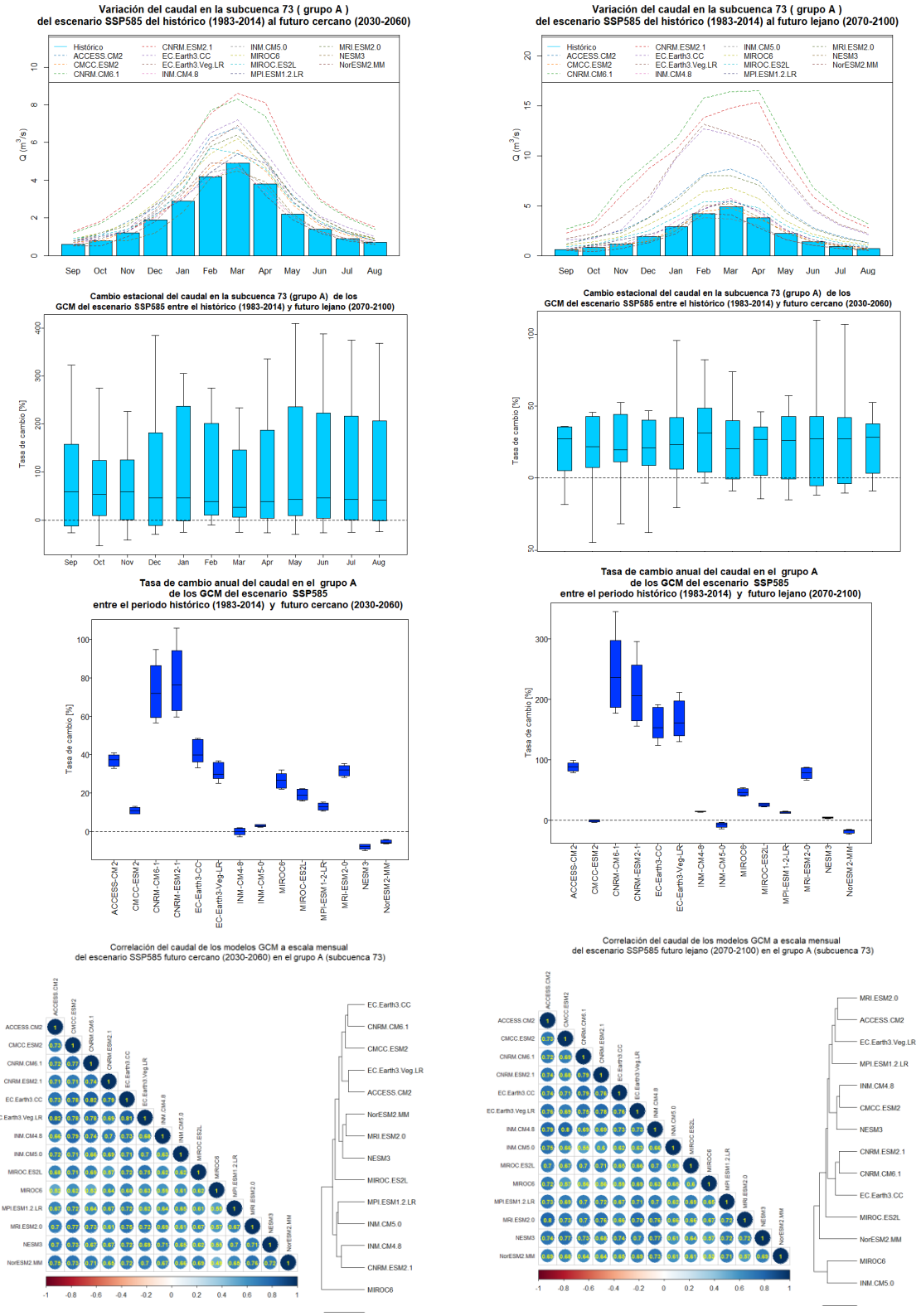


Figura 04: Variação da vazão média sazonal e correlograma dos GCM no cenário SSP5-8.5 nos períodos de futuro próximo e futuro distante para o grupo A.
Fonte: elaboração própria com base nos dados processados (2026)

Projeções anuais de vazões na bacia do rio Pativilca em futuros próximos e distantes sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5

As Figuras 5 e 6 apresentam as projeções anuais de vazões na bacia do rio Pativilca para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente, abrangendo o período histórico (1983–2014) e os horizontes futuros próximo (2030–2060) e distante (2070–2100). Os resultados indicam um aumento progressivo das vazões em todos os grupos de sub-bacias (A, B, C, D, E e F) ao longo da transição do período histórico para os cenários futuros. Esse incremento é mais pronunciado no cenário SSP5-8.5, sugerindo que maiores emissões de gases de efeito estufa amplificam as respostas hidrológicas na região.

No período histórico, as vazões apresentam relativa estabilidade, refletindo condições hidrológicas consistentes. Entretanto, nos cenários de futuro próximo e distante, observa-se aumento nas medianas e nos intervalos interquartis (25%–75%), especialmente nas sub-bacias de menor altitude, como as do grupo F, onde os incrementos de vazão podem estar associados ao aumento do escoamento superficial e a possíveis mudanças nos padrões de precipitação. Essas tendências evidenciam a elevada vulnerabilidade das bacias de jusante aos impactos das mudanças climáticas.

O cenário SSP2-4.5, associado a um nível moderado de emissões, apresenta incrementos menos expressivos quando comparado ao SSP5-8.5, que representa um cenário de altas emissões. Esse comportamento indica que as emissões de gases de efeito estufa constituem um fator determinante na magnitude das mudanças hidrológicas projetadas. Adicionalmente, as sub-bacias localizadas em regiões de maior altitude (grupos A e B) apresentam comportamento mais homogêneo nas projeções, enquanto as sub-bacias de menor altitude (grupos E e F) exibem maior dispersão, refletindo sua maior sensibilidade a eventos hidrológicos extremos e à variabilidade climática.

De modo geral, as projeções indicam uma tendência de aumento das vazões no futuro, com diferenças significativas entre os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Esse aumento impõe desafios relevantes para a gestão dos recursos hídricos na bacia do Pativilca, especialmente nas regiões de jusante, onde as mudanças projetadas são mais intensas e podem implicar riscos associados a inundações e ao manejo hídrico. Esses resultados ressaltam a importância de integrar tais projeções em estratégias de adaptação e planejamento sob condições de mudança climática.

Os resultados obtidos para a bacia do rio Pativilca são consistentes com evidências globais que apontam para a intensificação do ciclo hidrológico sob cenários CMIP6. O aumento progressivo das vazões observado em todos os grupos de sub-bacias, especialmente sob o cenário SSP5-8.5, está em concordância com projeções globais que indicam que aproximadamente 72% da superfície terrestre poderá experimentar aumento no escoamento sob cenários de altas emissões (Wu et al., 2024). A maior intensificação das respostas hidrológicas no cenário SSP5-8.5 em comparação ao SSP2-4.5 confirma a predominância da incerteza associada aos cenários de emissões em relação à incerteza dos modelos climáticos em projeções de longo prazo, conforme documentado em avaliações recentes do Intergovernmental Panel on Climate Change (Caretta et al., 2021).

Esse comportamento também está alinhado com estudos em bacias andinas, nos quais cenários de altas emissões apresentam alterações mais significativas nos padrões de escoamento, acompanhadas de intensificação da sazonalidade hidrológica (Vuille, 2013). A maior vulnerabilidade observada nas sub-bacias de menor altitude (grupos E e F), em comparação com as sub-bacias de maior altitude (grupos A e B), reforça padrões previamente documentados em estudos hidrológicos nos Andes tropicais, onde as regiões de jusante apresentam maior sensibilidade às variações de precipitação e temperatura (Ochoa-Tocachi et al., 2016; Vuille, 2013).

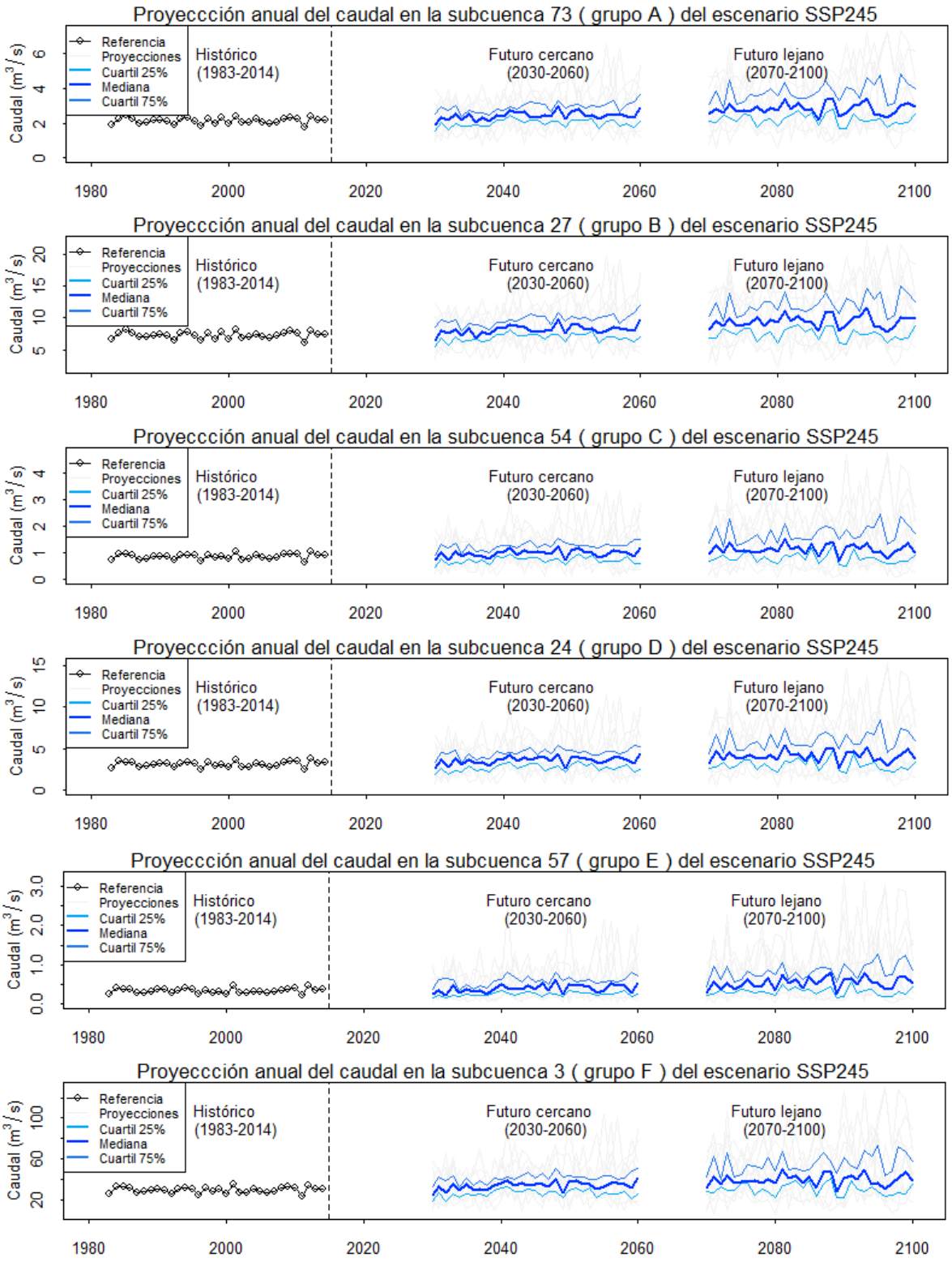


Figura 05: Variação da vazão média anual no cenário SSP2-4.5 nos períodos de futuro próximo e futuro distante na bacia do rio Pativilca.
Fonte: elaboração própria com base nos dados processados (2026)

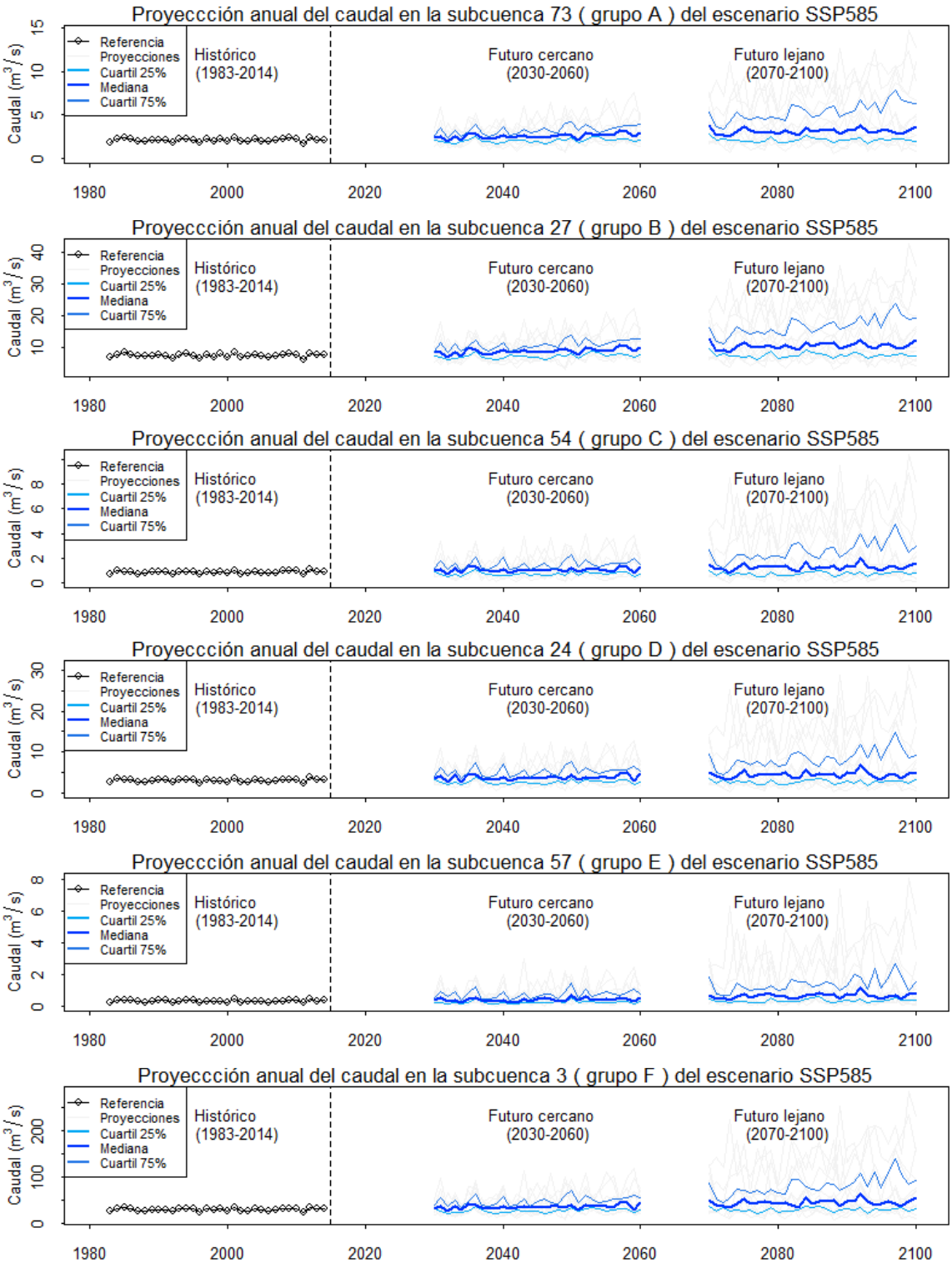


Figura 06: Variação da vazão média anual no cenário SSP5-8.5 nos períodos de futuro próximo e futuro distante na bacia do rio Pativilca.
Fonte: elaboração própria com base nos dados processados (2026)

Considerações Finais

A bacia altoandina do rio Pativilca demonstra elevada vulnerabilidade frente aos impactos das mudanças climáticas, evidenciando forte sazonalidade hidrológica controlada pela altitude e intensificação do ciclo hidrológico sob cenários futuros. As projeções baseadas em CMIP6 indicam aumento significativo da temperatura (1,3 °C a 4,8 °C) e da precipitação (7,8% a 106%), concentrada principalmente na estação úmida, resultando em incrementos expressivos nas vazões médias, especialmente sob o cenário SSP5-8.5.

Os resultados do modelo SWAT, devidamente calibrado e validado, evidenciam aumentos relevantes nos caudais mensais e elevada variabilidade interanual, com maior sensibilidade nas sub-bacias de menor altitude. Destaca-se o comportamento da unidade hidrográfica 07, com incrementos de vazão de até 142% no horizonte futuro distante, o que indica potenciais implicações para o aproveitamento hidroenergético.

Entretanto, a elevada dispersão entre os modelos climáticos, especialmente nas projeções de precipitação, evidencia incertezas significativas inerentes ao modelamento climático em regiões altoandinas. Esse cenário reforça a necessidade de incorporar abordagens integradas de modelagem hidrológica, análise de incertezas e planejamento adaptativo, visando uma gestão sustentável e resiliente dos recursos hídricos e do potencial hidroenergético em bacias de montanha sob condições de mudanças climáticas.

Agradecimentos

Os autores expressam seu agradecimento à Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, em especial ao Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, pelo financiamento que tornou possível o desenvolvimento desta pesquisa.

De igual forma, agradecem ao Universidad Nacional Agraria La Molina, particularmente ao programa de doutorado em Recursos Hídricos da pós-graduação, pelo fomento ao conhecimento científico na área de mudanças climáticas.

Referências Bibliográficas

ALBERCA, J.; MEJÍA, J.; GUEVARA-PÉREZ, E. Estimación del efecto del cambio climático sobre los caudales en la cuenca del río Piura usando GCM del CMIP6. Revista Ingeniería UC, v. 29, n. 2, p. 136–144, 2023. DOI: https://doi.org/10.54139/REVINGUC.V29I3.290

AMAT Y LEÓN, C. et al. El cambio climático no tiene fronteras. 2008. Disponível em: https://www.comunidadandina.org/StaticFiles/OtrosTemas/MedioAmbiente/libro_cambioclimatico.pdf. Acesso em: 2026.

ANA. Metodología de codificación de unidades hidrográficas de Pfafstetter. Lima: Autoridad Nacional del Agua, 2010

BARRESI ARMOA, O. L. et al. Representation of hydrological components under a changing climate: a case study using SWAT+. Water, v. 15, n. 14, p. 2604, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/w15142604

BELLO CHIRINOS, C. et al. La producción hidroeléctrica y su influencia hidrológica. 2024. DOI: https://doi.org/10.21142/SS-0501-2024-e099

BEZERRA DE MELO, M. H. et al. Análise da variação térmica e índice pluviométrico em bacias hidrográficas. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 18, n. 1, p. 1–18, 2025. DOI: https://doi.org/10.26848/RBGF.V18.1.P001-018

CARETTA, M. A. et al. Water. In: IPCC. Climate change 2021: impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009325844.006

COMISIÓN TÉCNICA MULTISECTORIAL. Política y estrategia nacional de recursos hídricos del Perú. 2009.

FERNÁNDEZ CÁRDENAS, R. D. et al. La oferta hídrica del río Zulia en Colombia. Ciencia Latina, v. 9, n. 2, p. 5479–5499, 2025. DOI: https://doi.org/10.37811/CL_RCM.V9I2.17308

FERNANDEZ-PALOMINO, C. A. et al. High-resolution climate projection dataset based on CMIP6. Scientific Data, v. 11, 2024. DOI: https://doi.org/10.1038/S41597-023-02863-Z

HLAING, P. T. et al. Hydrological model parameter regionalization. MethodsX, v. 13, p. 102792, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102792

.IPCC. Cambio climático 2021: bases físicas. 2021.

LI, B.; FENG, Q.; WANG, Y. Historical and future runoff changes. Catena, v. 235, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107684

LOPERA MUÑOZ, L. M. Efectos del cambio climático sobre el régimen de caudales. 2022.

MARRAS, P. A. et al. Future precipitation and streamflow changes. Journal of Hydrology, v. 603, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127025

MINISTERIO DEL AMBIENTE. Contribuciones determinadas a nivel nacional del Perú. 2020. Disponível em: https://unfccc.int

NEITSCH, S. L. et al. Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation. 2011.

OBSERVATORIO DEL AGUA – ANA. 2024.

OCHOA-TOCACHI, B. F. et al. Impacts of land use on hydrological response. Hydrological Processes, 2016. DOI: https://doi.org/10.1002/hyp.10980

PINTO GARAY, D. A. Proyecciones de eventos extremos CMIP6 en Chile. 2022.

PROYECTO GLACIARES. Condiciones hidro-climáticas de los Andes peruanos. 2019. Disponível em: https://proyectoglaciares.care.org.pe

TEKLAY, A. et al. Modeling climate change impacts in Lake Tana basin. Dynamics of Atmospheres and Oceans, v. 97, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2021.101278

VILLEGAS, P. Expectativas de la generación eléctrica en el Perú. KPMG, 2025.

VUILLE, M. Climate change and water resources in the tropical Andes. 2013.

WU, Y. et al. Hydrological projections under CMIP5 and CMIP6. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 105, n. 1, p. E59–E74, 2024. DOI: https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0104.1

INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA FORMAÇÃO DE ILHAS DE CALOR EM UBERABA (MG)
INFLUENCE OF LAND USE AND LAND COVER ON THE FORMATION OF URBAN HEAT ISLANDS IN UBERABA (MG)

1 Salime Amorim Al Manne, 1 Jéssica Costa Lopes, 1 Mário Sergio da luz, 2 Cristiano Poleto, 1 Patrícia Diniz Martins, 1 Julio Cesar S. I. Gonçalves, 1 Ariana de Campos

1 Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Avenida Dr. Randolfo Borges Júnior, n° 1400, Uberaba, MG, CEP: 38064-200, Brazil; 2 Departamento de Hidromecânica e Hidrologia, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Avenida Bento Gonçalves, n° 9500, Porto Alegre, RS, CEP 91501-970, Brazil

Palavras-chave: climatologia urbana; ilha de calor urbana; uso e ocupação do solo; planejamento urbano.

Resumo

O trabalho analisa a influência do uso e ocupação do solo na formação de ilhas de calor urbanas em Uberaba (MG), com ênfase na relação entre morfologia urbana, cobertura vegetal e distribuição térmica intraurbana. A pesquisa baseia-se em medições de temperatura realizadas em 25 pontos distribuídos ao longo das avenidas Dr. Randolfo Borges Júnior, Leopoldino de Oliveira e Niza Marques Guaritá, por meio de transectos móveis e registros ponto a ponto e contínuos. A análise térmica foi articulada à caracterização do uso e ocupação do solo em pontos representativos do percurso, considerando vegetação pouco alterada, pavimentação asfáltica, edificações e áreas permeáveis. Os resultados indicaram a ocorrência recorrente de ilhas de calor de forte e muito forte magnitude, com intensidade máxima de 9,4°C nas medições contínuas e maior expressividade no período seco. As temperaturas mais elevadas concentraram-se no setor central, especialmente no ponto P14, marcado por alta densidade construtiva, elevada pavimentação e baixa permeabilidade. Em contraposição, pontos periféricos e próximos a cursos d'água, como P8 e P25, apresentaram temperaturas mais amenas. Conclui-se que a morfologia urbana de Uberaba influencia diretamente a formação de ilhas de calor, evidenciando a necessidade de incorporar critérios climáticos ao planejamento urbano, ao zoneamento e às políticas de arborização e permeabilidade.

Keywords: urban climatology; urban heat island; land use; urban planning.

Abstract

This paper analyzes the influence of land use and occupation on the formation of urban heat islands in Uberaba, Minas Gerais, Brazil, emphasizing the relationship between urban morphology, vegetation cover, soil permeability and intra-urban thermal distribution. The study is based on temperature measurements collected between June 2012 and January 2014 at 25 sampling points distributed along Dr. Randolfo Borges Júnior, Leopoldino de Oliveira and Niza Marques Guaritá avenues, using mobile transects and point-by-point and continuous measurements. Thermal data were associated with land use characterization in representative points of the route, considering vegetation, asphalt pavement, buildings and permeable areas. Results showed recurrent heat islands of strong and very strong magnitude, reaching a maximum intensity of 9.4°C in continuous measurements and higher intensity during the dry season. The highest temperatures were concentrated in the central sector, especially at point P14, characterized by dense construction, extensive pavement and limited permeability. Conversely, peripheral points near watercourses, such as P8 and P25, presented lower temperatures. The findings indicate that Uberaba's urban morphology directly influences the formation of heat islands and reinforce the importance of incorporating climatic criteria into urban planning, zoning, urban greening and permeability policies.

Introdução

Recentes estudos divulgados pelo Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas - IPCC (2022) relatam que o processo de urbanização altera o meio ambiente através de uma série de fenômenos físicos que podem resultar em pressões ambientais locais. Estes incluem ilhas de calor urbanas e inundações que podem ser intensificadas pela mudança climática. É fundamental entender a interação entre os processos de alterações ambientais locais, urbanização e mudanças climáticas, pois a natureza densa de muitas cidades exerce grande influência sobre as emissões antrópicas de calor e rugosidade da superfície, relacionadas ao consumo de energia e às condições climáticas regionais.

À medida que a morfologia urbana é alterada com a canalização de córregos, verticalização das habitações, impermeabilização do solo, retirada da vegetação natural, entre outros fatores, superfícies que antes eram permeáveis e úmidas geralmente tornam-se impermeáveis e secas; esta evolução leva à formação de ilhas de calor (EPA, 2014).

O termo ilha de calor se refere a uma anomalia térmica onde a temperatura do ar urbano se caracteriza por ser superior a da vizinhança rural. A ilha de calor pode acontecer em diferentes escalas, tanto em localizações dentro da própria cidade, quanto na diferença de temperatura entre a área urbana e rural (Stewart; Mills, 2021).

As cidades mal planejadas sofrem graves problemas com o fenômeno denominado ilha de calor, que ocorre em locais com excessiva quantidade de construções e baixa concentração de áreas verdes. No entanto, em algumas cidades dos Estados Unidos e da Europa, o governo local é inovador nos setores de energia e meio ambiente, envolvendo-se em projetos de

demonstração e aplicação de medidas eficientes para mitigação de ilhas de calor e consequente melhoria do conforto ambiental, redução do consumo de energia, da poluição e de enchentes (Gartland, 2010).

Nas cidades de países de baixa e média renda, o crescimento urbano acelerado, associado à expansão informal e à insuficiência de infraestrutura, tende a ampliar vulnerabilidades socioambientais e riscos urbanos, especialmente em áreas com menor capacidade de planejamento e provisão de serviços. Nesse contexto, a urbanização não planejada pode intensificar problemas como impermeabilização do solo, exposição ao calor, enchentes e desigualdade no acesso a serviços urbanos, reforçando a necessidade de instrumentos de planejamento territorial capazes de orientar a ocupação do solo e promover trajetórias urbanas mais inclusivas, verdes, seguras e resilientes (Un-habitat, 2022).

No campo de estudo das ilhas de calor a contribuição de Oke (1973; 1999; 2012) foi bastante significativa, pois seus estudos demonstraram que o clima da cidade é produto de um fenômeno de transformação de energia a partir da interação entre o ar atmosférico e o ambiente urbano construído.

No Brasil, os estudos sobre o ambiente atmosférico urbano ganharam maior importância a partir da década de 70, quando Monteiro (1976) lançava uma proposta teórica para conduzir programas de pesquisas sobre os climas das cidades brasileiras, intitulada Sistema Clima Urbano (SCU) e visa compreender a organização climática peculiar da cidade. No SCU todos os fatos da observação do clima da cidade implicam consideráveis transformações, das quais a ilha de calor e a poluição do ar são as mais eloquentes demonstrações.

O estudo da relação entre uso e ocupação do solo e o aumento da temperatura do ar em áreas urbanas é de grande importância para a identificação das fontes causadoras de ilhas de calor e para o desenvolvimento de metodologias mitigadoras de zonas de calor nessas áreas. Outro fator que deve ser considerado durante estes estudos é o tamanho da cidade estudada, pois as cidades de porte médio e pequeno possuem características geográficas, morfológicas e socioespaciais diferenciadas daquelas de grande porte e metropolitanas, o que influencia a formação, a intensidade e a distribuição espacial das ilhas de calor urbanas (Cardoso et al., 2017; Amorim, 2020; Porangaba; Teixeira; Amorim, 2017).

Uberaba, município localizado no Triângulo Mineiro, constitui caso relevante para a análise da relação entre clima urbano e uso do solo. A cidade apresenta áreas centrais densamente urbanizadas, eixos viários implantados em fundos de vale, supressão de vegetação e contrastes importantes entre setores consolidados e espaços periurbanos. Esses aspectos oferecem condições adequadas para investigar como diferentes padrões de ocupação interferem na temperatura do ar.

Diante disso, o objetivo deste artigo é analisar a influência do uso e ocupação do solo na formação de ilhas de calor em Uberaba (MG), a partir de medições de temperatura realizadas em transectos móveis e da caracterização espacial de pontos representativos do percurso estudado. Busca-se, ainda, discutir implicações dos resultados para o planejamento urbano e para estratégias de mitigação térmica.

Área de estudo e procedimentos metodológicos

A área de estudo situa-se no município de Uberaba (MG), localizado a 752 m de altitude, com coordenadas aproximadas de 19°45’27” S e 47°55’36” W (Figura 1). Uberaba abrange uma área total de 4.512 km² sendo que 94% correspondem à área rural do município. O perímetro urbano é composto por 128 km² de área urbana e por 130 km² de área de transição urbana perfazendo um total de 258 km² de perímetro urbano, porém a área urbanizada corresponde a apenas 84 km². As rodovias BR-050 e BR-262 cruzam o município e estão localizadas na área de transição urbana, sendo consideradas eixos de desenvolvimento as faixas de 500 metros de cada lado, medidos a partir do eixo de ambas as rodovias.

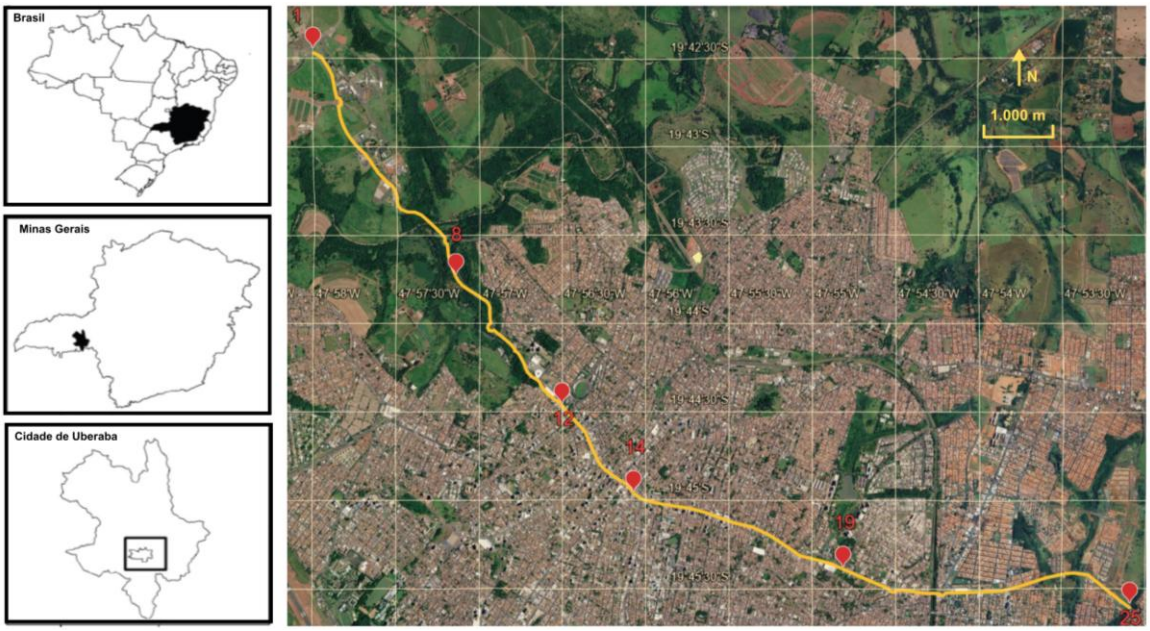


Figura 1 – Área de estudos e pontos de coleta principais

O clima regional é tropical quente e úmido, do tipo Aw segundo Köppen, com estação chuvosa concentrada nos meses de primavera-verão e estação seca no inverno. A urbanização do município ocorreu em parte sobre áreas de fundo de vale, característica relevante para a circulação do ar e para a distribuição térmica local (Fernandes et al., 2011).

O trajeto analisado compreendeu as avenidas Dr. Randolfo Borges Júnior, Leopoldino de Oliveira e Niza Marques Guaritá, totalizando aproximadamente 11 km no sentido oeste-leste da área urbana. A altitude mínima do trajeto foi de 703,2 m e a máxima de 814,8 m. Foram definidos 25 pontos de coleta (Tabela 1), distribuídos a intervalos aproximados de 500 m. As campanhas de medição ocorreram durante 19 meses, com a frequência de uma vez ao mês, abrangendo todas as estações do ano.

Tabela 1 – Pontos de coleta e coordenadas geográficas correspondentes

Pontos	Coordenadas geográficas	Pontos	Coordenadas geográficas
P1	S 19º 42' 22" W 47º 58' 17"	P14	S 19º 44' 54" W 47º 56' 08"
P2	S 19º 42' 30" W 47º 58' 01"	P15	S 19º 45' 00" W 47º 55' 51"
P3	S 19º 42' 40" W 47º 57' 52"	P16	S 19º 45' 09" W 47º 55' 38"
P4	S 19º 42' 57" W 47º 57' 47"	P17	S 19º 45' 10" W 47º 55' 22"
P5	S 19º 43' 08" W 47º 57' 37"	P18	S 19º 45' 19" W 47º 55' 06"
P6	S 19º 43' 22" W 47º 57' 28"	P19	S 19º 45' 24" W 47º 54' 49"
P7	S 19º 43' 30" W 47º 57' 14"	P20	S 19º 45' 30" W 47º 54' 32"
P8	S 19º 43' 44" W 47º 57' 09"	P21	S 19º 45' 32" W 47º 54' 15"
P9	S 19º 43' 56" W 47º 56' 57"	P22	S 19º 45' 31" W 47º 53' 59"
P10	S 19º 44' 07" W 47º 56' 49"	P23	S 19º 45' 29" W 47º 53' 44"
P11	S 19º 44' 19" W 47º 56' 40"	P24	S 19º 45' 25" W 47º 53' 27"
P12	S 19º 44' 30" W 47º 56' 29"	P25	S 19º 45' 24" W 47º 53' 19"
P13	S 19º 44' 43" W 47º 56' 18"		

As medidas foram registradas por meio de sensor de temperatura (resoluções de duas casas decimais para temperaturas entre 0 a 40ºC e uma casa decimal para temperaturas entre 40ºC a 100ºC) preso a uma haste de madeira com 1,2 m de comprimento, acoplado na lateral de um veículo. As medições ponto a ponto tiveram início por volta das 18h, com registros em cada ponto durante 30 segundos e frequência de 2 Hz, totalizando 60 medidas por ponto. Em seguida, foram realizadas medições contínuas no sentido inverso do trajeto, aproximadamente a partir das 19h. No início da medição, o sensor de temperatura foi programado para realizar aferições contínuas, deslocando-se no sentido leste-oeste (do ponto 25 ao 1) em velocidade média de 40km/h, interrompendo-se apenas ao final do percurso, com duração aproximada de 30 minutos. A escolha do período noturno relaciona-se ao comportamento típico das ilhas de calor, que tendem a se intensificar após o pôr do sol em razão da liberação gradual do calor armazenado pelos materiais urbanos (Oke, 1987).

A leitura e média dos dados coletados foram realizadas utilizando-se o programa Logger Lite (Vernier Software & Technology, 2018) instalado em microcomputador. Após análise, as informações referentes às médias de temperatura de cada ponto de coleta foram lançadas mês a mês em planilha eletrônica juntamente com a média das medidas contínuas. Assim, foi possível a identificação dos locais com maior ocorrência de temperaturas máximas e mínimas durante o trajeto. Após o levantamento térmico baseado nas temperaturas dos 25 pontos amostrais, foram identificados os locais com maiores ocorrências de picos máximos e mínimos de temperatura.

A intensidade das ilhas de calor foi calculada pela diferença entre a maior e a menor temperatura observada em cada campanha. A classificação adotada considerou quatro faixas: fraca magnitude, entre 0°C e 2°C; média magnitude, entre 2°C e 4°C; forte magnitude, entre 4°C e 6°C; e muito forte magnitude, acima de 6°C (Fernández García, 1996).

A análise do uso e ocupação do solo foi desenvolvida a partir de imagens de satélite do Google Earth Pro, referentes ao município de Uberaba (MG) e desenhos digitais sobrepostos, considerando cinco classes: vegetação pouco alterada, pavimentação asfáltica, edificações com até quatro pavimentos, edificações com mais de quatro pavimentos e áreas permeáveis. A análise detalhada concentrou-se nos pontos P8, P14 e P25, selecionados por apresentarem maior frequência relativa de picos térmicos máximos ou mínimos.

Resultados e Discussão

As campanhas realizadas indicaram a ocorrência de ilhas de calor em todo o período analisado. A intensidade foi mais elevada nas medições contínuas do que nas medições ponto a ponto, possivelmente em razão do horário mais tardio das medições contínuas, quando a liberação do calor acumulado pelas superfícies urbanas tende a acentuar os contrastes térmicos. Nas medições contínuas, 63% das campanhas apresentaram magnitude muito forte, enquanto nas medições ponto a ponto esse percentual foi de 21%.

A Figura 2 evidencia a distribuição percentual das magnitudes observadas nas duas modalidades de medição. Nota-se que as medições ponto a ponto concentraram maior proporção de ilhas de calor de forte magnitude, enquanto as medições contínuas apresentaram predominância de muito forte magnitude. A intensidade máxima observada foi de 8,3°C nas medições ponto a ponto e 9,4°C nas medições contínuas, revelando expressivo contraste térmico intraurbano.

A sazonalidade também interferiu na intensidade do fenômeno. No período seco (maio a setembro), a intensidade média foi de 5,4°C nas medições ponto a ponto e 6,9°C nas medições contínuas. No período chuvoso, de outubro a abril, os valores médios foram de 4,4°C e 6,6°C, respectivamente. A maior intensidade no período seco sugere que a menor disponibilidade hídrica, a redução da umidade e a menor evaporação contribuem para ampliar o aquecimento urbano noturno.

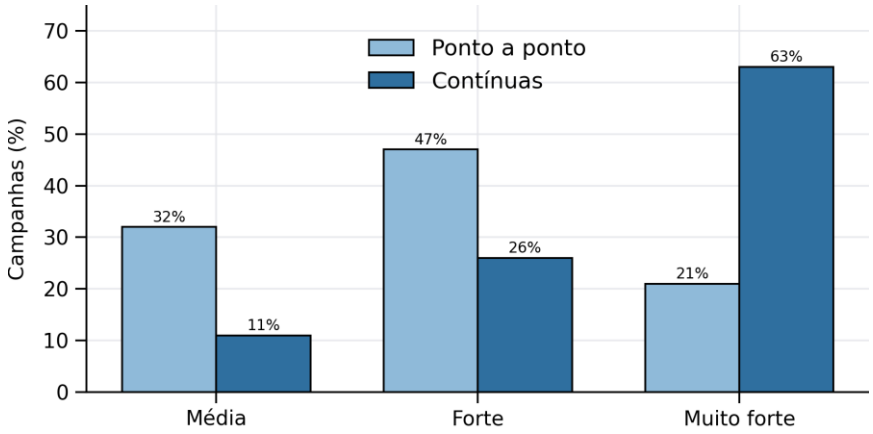


Figura 2 – Distribuição percentual das magnitudes das ilhas de calor nas campanhas de medição

Na Figura 3 (a e b), são apresentados os diagramas box-plot das medições ponto a ponto realizadas durante o período seco (inverno) e chuvoso (verão), respectivamente. Os pontos P12, P13, P14, P15, P16 e P17, localizados na zona central, mais urbanizada da cidade, apresentaram média de temperatura mais elevadas em relação aos outros pontos, tanto no inverno como no verão.

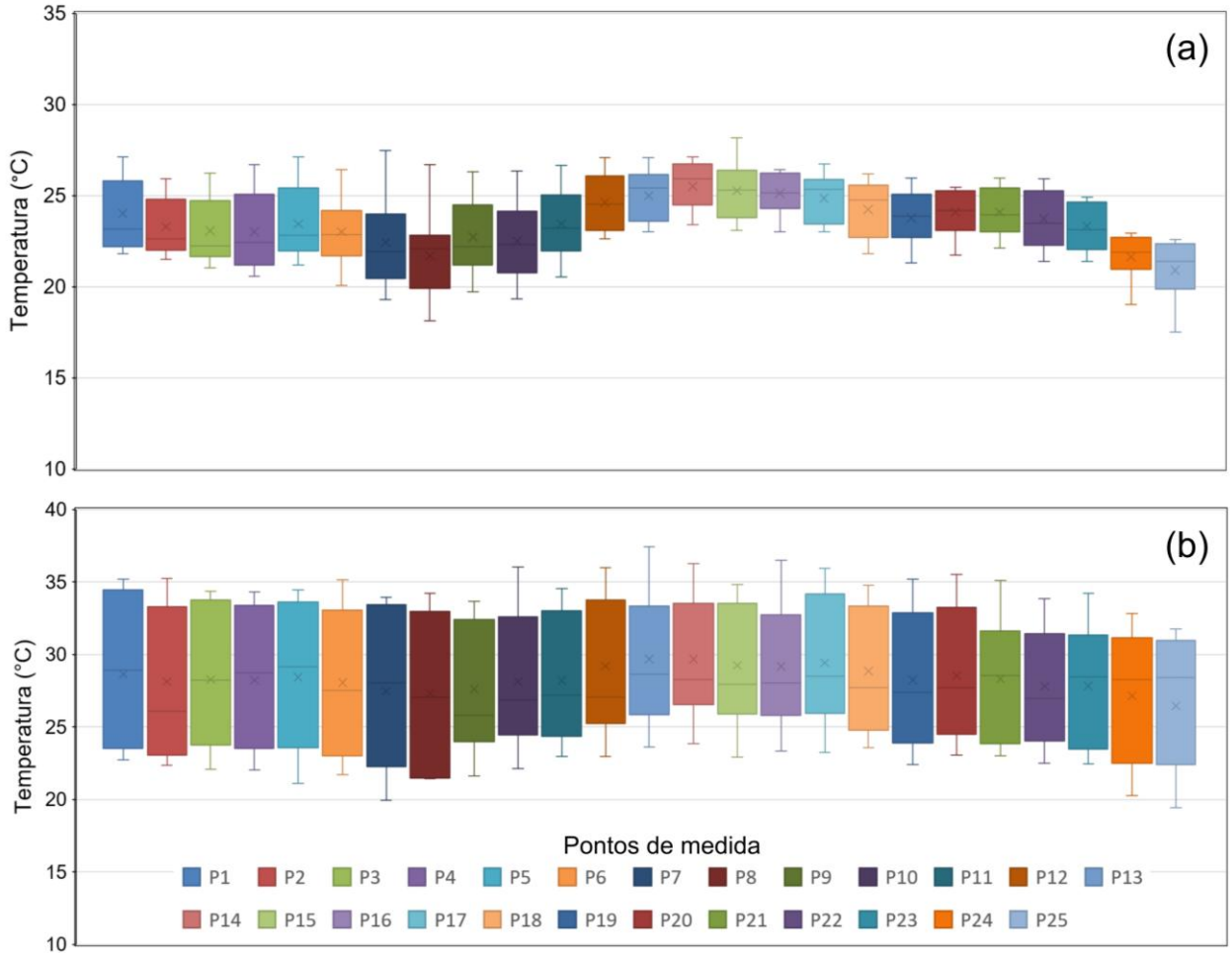


Figura 3 - Diagrama box-plot para os 25 pontos de coleta de dados nas medições ponto a ponto; (a) período seco; (b) período chuvoso

O perfil das ilhas de calor dos grandes centros urbanos traçado por Oke (1973) descreveu que o local da cidade com maior atividade antrópica, normalmente o centro, se caracteriza por ser mais quente do que os bairros residenciais e periféricos. Este perfil foi chamado *perfil clássico das ilhas de calor*, o que justifica a ocorrência de maiores médias de temperatura na zona central de Uberaba. Estudos recentes sobre ilhas de calor urbanas também indicam que as áreas de maior densidade construtiva e maior proporção de superfícies impermeáveis tendem a apresentar temperaturas mais elevadas do que setores periféricos ou com maior presença de vegetação, configurando o padrão térmico típico das ilhas de calor urbanas (ZHAO; FAN; HONG, 2025).

Outra possível justificativa para este resultado seria o fato de a região central da cidade estar localizada em uma depressão geográfica, fazendo com que a frequência e a velocidade média dos ventos sejam extremamente baixas, minimizando o efeito das trocas térmicas por convecção e ressaltando ainda mais a influência do espaço construído sobre a temperatura do ar (Duarte e Serra, 2003).

A distribuição espacial das temperaturas revelou maior aquecimento e entre os pontos P12 e P17. O ponto P14, situado na Avenida Leopoldino de Oliveira, apresentou maior frequência de picos máximos de temperatura e temperatura média de 28°C. Essa área caracteriza-se por intensa ocupação urbana, grande proporção de edificações, pavimentação asfáltica e baixa quantidade de áreas permeáveis. Os pontos P8 e P25, por sua vez, apresentaram maior frequência de picos mínimos, situando-se em áreas mais afastadas do núcleo central e próximas a cursos d'água.

A comparação entre os pontos P8, P14 e P25 permite observar a relação direta entre padrão de ocupação e comportamento térmico (Figura 4). O P14 reúne condições favoráveis à intensificação da ilha de calor: ausência de vegetação pouco alterada, presença expressiva de pavimentação asfáltica, predomínio de edificações de até quatro pavimentos e baixa permeabilidade. Já P8 e P25 apresentam maior proporção de áreas permeáveis e vegetação, além da proximidade com cursos d'água, elementos que contribuem para temperaturas médias inferiores.

Os resultados reforçam a importância da cobertura vegetal e da permeabilidade na modulação térmica urbana. A vegetação favorece o sombreamento, a evapotranspiração e a manutenção de microclimas mais amenos, enquanto áreas impermeabilizadas reduzem a infiltração, diminuem a evaporação e aumentam o armazenamento de calor (Winbourne et al., 2020; Cheela et al., 2021; Alonzo; Ibsen; Locke, 2025). No P14, a baixa presença de áreas permeáveis associada ao adensamento de edificações intensifica o aquecimento noturno e a permanência do calor acumulado durante o dia.

A análise permite afirmar que a ilha de calor em Uberaba não decorre de um único fator, mas da combinação entre densidade construtiva, impermeabilização, baixa arborização, tráfego e configuração geomorfológica urbana. Essa constatação reforça a necessidade de políticas integradas de planejamento urbano que considerem, simultaneamente, zoneamento, infraestrutura verde, drenagem urbana, mobilidade e desenho das vias.

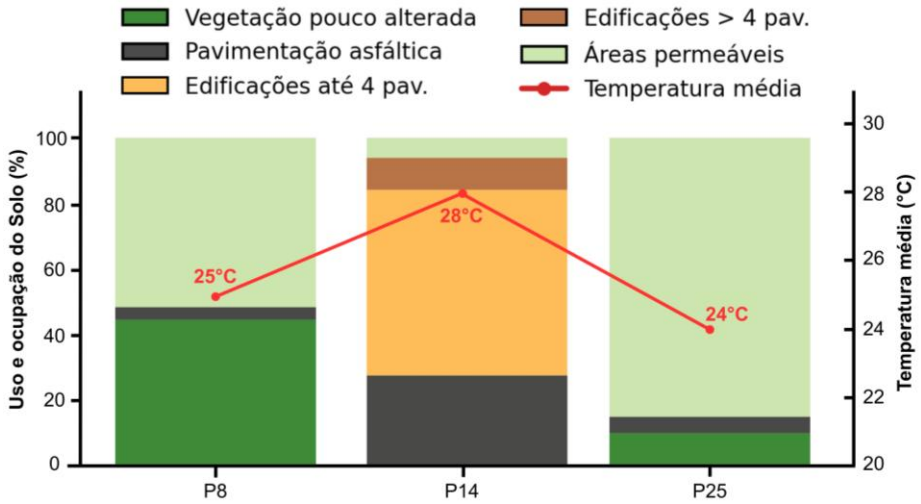


Figura 4 – Relação entre uso e ocupação do solo e temperatura média nos pontos P8, P14 e P25

Implicações para o planejamento urbano de Uberaba

Os resultados indicam que a incorporação de critérios climáticos ao planejamento urbano de Uberaba é fundamental para mitigar o desconforto térmico e reduzir a intensidade das ilhas de calor. A ampliação da arborização urbana deve ser priorizada especialmente nos setores centrais e nos eixos viários de maior densidade construtiva, com espécies adequadas ao clima local e capazes de promover sombreamento efetivo.

A preservação e recuperação de fundos de vale também devem ser consideradas como estratégia ambiental e climática. Esses espaços podem atuar como corredores de ventilação, áreas de infiltração e zonas de amenização térmica, desde que associados à recomposição vegetal e à redução da impermeabilização. A criação de parques lineares e faixas verdes ao longo de cursos d'água pode contribuir simultaneamente para o conforto térmico, a drenagem urbana e a qualidade paisagística (Probst et al., 2022; Kumar et al., 2024; Lin; Li, 2025).

Nesse sentido, a incorporação das Zonas Climáticas Locais (LCZs) ao planejamento urbano pode contribuir para uma leitura mais precisa das diferenças térmicas intraurbanas, ao relacionar forma urbana, cobertura da superfície, densidade

construtiva, vegetação e materiais predominantes. O estudo de Pinton, Stewart e Suizu (2026), desenvolvido em Uberaba, demonstra que a integração entre LCZs e classes de relevo permite aprimorar a metodologia de investigação das ilhas de calor, especialmente em contextos nos quais altitude, posição topográfica e formas do terreno interferem na circulação do ar e na distribuição espacial da temperatura.

Para Uberaba, essa abordagem é particularmente pertinente, pois a área urbana apresenta fundos de vale, diferenças altimétricas, eixos viários implantados em áreas deprimidas e contrastes entre setores centrais adensados e áreas periféricas mais abertas. A aplicação combinada de LCZs e classes de relevo poderia subsidiar a definição de zonas prioritárias para arborização, aumento da permeabilidade, proteção de corredores de ventilação e revisão de parâmetros urbanísticos, permitindo que o zoneamento incorpore não apenas o uso do solo, mas também as condições topoclimáticas que condicionam a formação e a persistência das ilhas de calor.

Considerações finais

A análise da influência do uso e ocupação do solo na formação de ilhas de calor em Uberaba permitiu identificar contrastes térmicos expressivos entre áreas densamente urbanizadas e setores menos adensados ou com maior presença de vegetação e permeabilidade. As medições realizadas confirmaram a ocorrência de ilhas de calor de forte e muito forte magnitude, atingindo intensidade máxima de 9,4°C.

As maiores temperaturas foram registradas na área central, especialmente no ponto P14, caracterizado por elevada proporção de edificações, pavimentação asfáltica e baixa permeabilidade do solo. Em oposição, os pontos P8 e P25 apresentaram temperaturas médias inferiores, associadas à maior presença de áreas permeáveis, vegetação pouco alterada e proximidade com cursos d'água. Esses resultados evidenciam que a morfologia urbana e os padrões de ocupação condicionam diretamente a distribuição térmica intraurbana.

Conclui-se que estudos de clima urbano são fundamentais para subsidiar instrumentos de planejamento territorial, sobretudo em cidades médias em processo de expansão. Para Uberaba, recomenda-se a ampliação da arborização urbana, a proteção de fundos de vale, o aumento da permeabilidade do solo, o incentivo a materiais de maior refletância e a inclusão de parâmetros climáticos no zoneamento urbano. Tais medidas podem contribuir para reduzir o desconforto térmico, melhorar a qualidade ambiental e fortalecer a resiliência urbana frente às mudanças climáticas.

Referências Bibliográficas

ALONZO, Michael; IBSEN, Peter C.; LOCKE, Dexter H. **Urban Trees and Cooling: A Review of the Recent Literature (2018 to 2024)**. *Arboriculture & Urban Forestry*, v. 51, n. 5, p. 420-444, 2025.

AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. **Ilhas de calor urbano em cidades de pequeno e médio porte no Brasil e o contexto das mudanças climáticas**. *Confins*, n. 46, 2020.

CARDOSO, Renata dos Santos; DORIGON, Larissa Piffer; TEIXEIRA, Danielle Cardozo Frasca; AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. **Assessment of Urban Heat Islands in Small- and Mid-Sized Cities in Brazil**. *Climate*, v. 5, n. 1, artigo 14, 2017.

CHEELA, V. R. Sankar; JOHN, Michele; BISWAS, Wahidul; SARKER, Prabir. **Combating Urban Heat Island Effect—A Review of Reflective Pavements and Tree Shading Strategies**. *Buildings*, v. 11, n. 3, artigo 93, 2021.

DUARTE, Denise Helena Silva; SERRA, Geraldo Gomes. Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental brasileira: correlação e proposta de um indicador. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 7-20, 2003.

DUARTE, Denise Helena Silva; SERRA, Geraldo Gomes. Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental brasileira: correlação e proposta de um indicador. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 7-20, abr./jun. 2003.

FERNANDES, André L.T.; FRAGA JÚNIOR, Eusímio F.; TAKAY, Buno Y. Avaliação do método Penman-Piche para a estimativa da evapotranspiração de referência em Uberaba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 270-276, mar. 2011.

GARCIA, Fernández F. Manual de climatologia aplicada: clima, médio ambiente y planificación. Madrid: Editorial Síntesis, 1996.

GARTLAND, Lisa. Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. Tradução de Silvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

GARTLAND, Lisa. **Ilhas de Calor:** como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. Tradução de Silvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 248 p.

GOOGLE. **Google Earth Pro**. Imagem de satélite de Uberaba, Minas Gerais, Brasil, 2013. Dados cartográficos. Mountain View: Google, 2013. Acesso em: 28 jun. 2026.

KUMAR, Prashant et al. **Urban heat mitigation by green and blue infrastructure: Drivers, effectiveness, and future needs**. *The Innovation*, v. 5, n. 2, artigo 100588, 2024.

LIN, Haoqiu; LI, Xun. **The Role of Urban Green Spaces in Mitigating the Urban Heat Island Effect: A Systematic Review from the Perspective of Types and Mechanisms**. *Sustainability*, v. 17, n. 13, artigo 6132, 2025.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. Teoria e clima urbano. São Paulo: IGEOG/USP, 1976.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. Teoria e Clima Urbano. São Paulo: IGEOG/USP, 1976. (Série Teses e Monografias, 25).

OKE, Tim R. **Boundary layer climates**. 2. ed. London: Routledge, 1987.

OKE, Tim R. City size and the urban heat island. Atmospheric Environment, Oxford, v. 7, p. 769-779, 1973.

OKE, Tim R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**, Oxford, v.7, p. 769-779, 1973.

OKE, Tim R. et al. The energy balance of central Mexico City during the dry season. **Atmospheric Environment**, Oxford, v.33, p. 3919-3930, 1999.

PINTON, Leandro de Godoi; STEWART, Iain Douglas; SUIZU, Tainá Medeiros. **Using surface relief classes with LCZs for an improved heat island methodology: Demonstration in a small Brazilian city**. *Urban Climate*, 2026. DOI: 10.1016/j.uclim.2026.*102972.*

PORANGABA, Gislene Figueiredo Ortiz; TEIXEIRA, Danielle Cardozo Frasca; AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. **Procedimentos metodológicos para análise das ilhas de calor em cidades de pequeno e médio porte**. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 21, 2017.

PROBST, Noëmie; BACH, Peter M.; COOK, Lauren M.; MAURER, Max; LEITÃO, João P. **Blue Green Systems for urban heat mitigation: mechanisms, effectiveness and research directions**. *Blue-Green Systems*, v. 4, n. 2, p. 348-376, 2022.

STEWART, Iain D.; MILLS, Gerald. **The Urban Heat Island: A Guidebook**. International Association for Urban Climate, 2021.

STEWART, Iain D.; OKE, Tim R. **Local Climate Zones for Urban Temperature Studies**. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 93, n. 12, p. 1879-1900, 2012.

U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY'S OFFICE OF ATMOSPHERIC PROGRAMS. Climate Protection Partnership Division. **Reducing Urban Heat Islands:** Compendium of Strategies – Urban Heat Islands Basics. Disponível em: < http://www.epa.gov/heatisland/resources/pdf/BasicsCompendium.pdf >. Acesso em: 22 fev. 2014.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Reducing urban heat islands: compendium of strategies. Washington, DC: EPA, 2014.

UN-HABITAT. **World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities**. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2022.

UN-HABITAT. **World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities**. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2022.

VERNIER SOFTWARE & TECHNOLOGY. **Logger Lite**: version 1.9.4. Beaverton: Vernier Software & Technology, 2018. Software.

WINBOURNE, Joy B.; JONES, Taylor S.; GARVEY, Sarah M.; HARRISON, Jamie L.; WANG, Liang; LI, Dan; TEMPLER, Pamela H.; HUTYRA, L. R. **Tree Transpiration and Urban Temperatures: Current Understanding, Implications, and Future Research Directions**. *BioScience*, v. 70, n. 7, p. 576-588, 2020.

ZHAO, Lili; FAN, Xuncheng; HONG, Tao. **Urban Heat Island Effect: Remote Sensing Monitoring and Assessment—Methods, Applications, and Future Directions**. *Atmosphere*, v. 16, n. 7, artigo 791, 2025.